



HAL
open science

Conception d'un outil d'aide à la décision pour guider le choix du type de dispositif de franchissement à mettre en place sur un obstacle à la continuité écologique

Loïc Vonie

► To cite this version:

Loïc Vonie. Conception d'un outil d'aide à la décision pour guider le choix du type de dispositif de franchissement à mettre en place sur un obstacle à la continuité écologique. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03605855

HAL Id: dumas-03605855

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03605855v1>

Submitted on 11 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Conception d'un outil d'aide à la décision pour guider le choix du type de dispositif de franchissement à mettre en place sur un obstacle à la continuité écologique

Vienne 86 - Poitiers

Août 2021



VONIE Loïc
Promotion Liège
Spécialité : Exploitation et travaux

Mémoire présenté pour l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Stage réalisé du 9 Janvier au 9 Juillet 2021



Remerciements

Ce travail de recherche, au-delà des résultats qu'il représente, est avant tout le fruit d'un travail laborieux que je n'aurais pas pu réaliser seul. Je tiens donc à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce projet et qui m'ont épaulé lors de la rédaction de ce mémoire.

À l'ensemble du personnel de NCA Environnement pour son accueil et son accompagnement.

À mon tuteur de stage, Monsieur Germain PASQUIER ingénieur ENGEES, pour sa disponibilité, sa patience, son implication et ses conseils avisés. À Madame Christelle SOULAS ingénieure ENGEES, Madame Elisabeth NOISETTE ingénieure Ense³ et Monsieur Damien PALET chargé d'études flore et habitats pour leurs connaissances respectives en maîtrise d'œuvre, en modélisation hydraulique et en flore aquatique.

À mon tuteur ENGEES, Monsieur Guilhem DELLINGER professeur à l'ENGEES, pour son suivi et sa disponibilité. À Monsieur Amir NAFI professeur à l'ENGEES pour son aide et ses conseils dans les thématiques de l'aide à la décision multicritère et des systèmes d'inférence floue.

À mon jury, Monsieur José Vasquez, Monsieur Bastien CLOUET et Monsieur Aurélien BEAUMONT, pour m'avoir permis de présenter mon travail, pour l'avoir relu et évalué avec intérêt.

Résumé

Conception d'un outil d'aide à la décision pour guider le choix du type de dispositif de franchissement à mettre en place sur un obstacle à la continuité écologique.

Le bureau d'études NCA Environnement m'a sollicité afin de concevoir un outil d'aide à la décision multicritères permettant de déterminer, en phase diagnostic ou en phase d'avant-projet sommaire, une orientation préférentielle des ouvrages de franchissement piscicole à implanter sur un site d'étude.

Le modèle, basé sur les systèmes d'inférence floue, prend en compte les caractéristiques biologique, topographique, hydraulique et hydrologique intrinsèques à chaque site d'étude afin d'émettre un résultat cohérent. L'outil se veut d'être intuitif, pratique et rapide d'utilisation. Les paramètres nécessaires à la construction de l'outil sont obtenus grâce à des sources de données en ligne (Géoportail, Banque Hydro, Vigicrues, InfoTerre, CCTP, et cætera...) et ne nécessitent pas de levées topographiques ni d'études complémentaires poussées. Un outil d'estimation du coût du projet a également été développé afin d'ajouter une dimension économique au processus de décision.

Pour NCA Environnement, l'intérêt de cette démarche est d'apporter une plus-value technique aux études préalables afin de permettre au maître d'ouvrage d'appréhender au mieux les contraintes du site sur la base d'un outil clair et synthétique. L'estimation du coût des travaux permet aux différents acteurs de se projeter d'un point de vue financier et d'évaluer approximativement la concordance entre l'enveloppe budgétaire, les subventions et l'évaluation du coût.

Abstract

Design of a decision support tool to guide the choice of the type of crossing device to be installed on an obstacle to ecological continuity.

The consultancy NCA Environnement asked me to build a multi-criteria decision support tool to determine, in the diagnostic phase or in the preliminary design phase, a preferential orientation for the fish passage structures to be installed on a study site.

The model, based on fuzzy inference systems, takes into account the biological, topographical, hydraulic and hydrological characteristics intrinsic to each study site in order to produce a coherent result. The tool is intended to be intuitive, practical and quick to use. The parameters required to carry out the method are obtained from online data sources (Géoportail, Banque Hydro, Vigicrues, InfoTerre, CCTP, etc.) but do not require topographic surveys or extensive additional studies. A project cost estimation tool has also been developed to add an economic dimension to the decision-making process.

For NCA Environnement, the interest of this approach is to bring a technical added value to the preliminary studies in order to allow the project owner to better understand the constraints of the site on the basis of a clear and synthetic tool. The estimate of the cost of the works allows the various actors to project themselves from a financial point of view and to evaluate the approximate concordance between the budget envelope, the subsidies and the cost evaluation.

SOMMAIRE

I. DEFINITION DU SUJET	11
II. CADRE DU PROJET	12
II. 1. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE.....	12
II. 2. CONTEXTE REGLEMENTAIRE ENCADRANT L'ETUDE.....	12
II. 3. ÉTAT DE L'ART ET GUIDES DE REFERENCES DES DISPOSITIFS DE FRANCHISSEMENT PISCICOLE.....	13
II. 4. ANALYSE MULTICRITERE.....	15
II. 4. 1. Analyse multicritère : ensemble des actions potentielles.....	15
II. 4. 2. Critère et famille cohérente de critères.....	15
II. 4. 3. Critère et logique.....	16
III. LOGICIEL FISPRO : FUZZY INFERENCE SYSTEM PROFESSIONAL	17
III. 1. FUZZIFICATION.....	17
III. 2. MOTEUR D'INFERENCE.....	18
III. 3. DEFUZZIFICATION.....	18
IV. PASSES A POISSONS	20
IV. 1. PASSES A POISSONS SELECTIONNEES.....	20
IV. 1. 1. Passes à bassins successifs.....	20
IV. 1. 2. Passes « naturelles ».....	23
IV. 2. PASSES A POISSONS REJETEES.....	29
IV. 2. 1. Passes à bassins successifs à orifices de fond.....	29
IV. 2. 2. Passes à ralentisseurs.....	29
IV. 2. 3. Passes à anguilles.....	30
IV. 2. 4. Passes à ascenseurs et à écluses.....	30
V. CRITERES	31
V. 1. CRITERE N°1 : ESPECES PISCICOLES DIMENSIONNANTES.....	31
V. 1. 1. Définition et objectif du critère.....	31
V. 1. 2. Construction du critère.....	31
V. 1. 3. Acquisition de la donnée.....	33
V. 1. 4. Traduction du critère sur FisPRO.....	33
V. 1. 5. Analyse critique et incertitude du critère.....	34
V. 2. CRITERE N°2 : SURFACE D'IMPLANTATION DISPONIBLE PAR RAPPORT A LA HAUTEUR DE CHUTE MAXIMALE.....	35
V. 2. 1. Définition et objectif du critère.....	35
V. 2. 2. Construction du critère.....	36
V. 2. 3. Acquisition de la donnée.....	37
V. 2. 4. Traduction du critère sur FisPRO.....	38
V. 3. CRITERE N°3 : HAUTEUR DE CHUTE.....	39
V. 3. 1. Définition et objectif du critère.....	39
V. 3. 2. Construction du critère.....	39
V. 3. 3. Acquisition de la donnée.....	39
V. 3. 4. Traduction du critère sur FisPRO.....	39
V. 3. 5. Analyse critique et incertitude du critère.....	40
V. 4. CRITERE N°4 : VARIATION DE LA HAUTEUR D'EAU AMONT.....	41
V. 4. 1. Définition et objectif du critère.....	41
V. 4. 2. Construction du critère.....	41
V. 4. 3. Acquisition de la donnée.....	42
V. 4. 4. Traduction du critère sur FisPRO.....	42

V. 4. 5. Analyse critique et incertitude du critère	43
V. 5. CRITERES REJETES	44
VI. OUTIL FISPRO	45
VI. 1. VARIABLES D'ENTREES ET VARIABLE DE SORTIE	45
VI. 2. REGLES FLOUES	46
VI. 2. 1. Construction du modèle basé sur les règles floues	46
VI. 2. 2. Logique de création des règles floues.....	48
VI. 2. 3. Interface de sortie.....	49
VI. 3. METHODE DE CALAGE ET DE VERIFICATION.....	50
VI. 3. 1. Première méthode de vérification : 42 cas concrets modélisé sur FisPRO.....	51
VI. 3. 2. Seconde méthode de vérification : 20 cas concrets analysés par des experts en RCE	51
VI. 4. ANALYSE CRITIQUE ET INCERTITUDES DE L'OUTIL	54
VI. 4. 1. Analyse statistique de la méthode.....	54
VI. 4. 2. Analyse critique de la méthode et des résultats obtenus	55
VII. OUTIL D'ESTIMATION DU COUT	56
VII. 1. DEFINITION ET OBJECTIFS DE L'OUTIL.....	56
VII. 2. CONSTRUCTION DE L'OUTIL D'ESTIMATION DU COUT	56
VII. 2. 1. Études.....	56
VII. 2. 2. Travaux.....	57
VII. 2. 3. Entretien	58
VII. 3. RESULTATS	58
VII. 4. ACQUISITION DE LA DONNEE	59
VII. 5. ANALYSE CRITIQUE ET INCERTITUDES DE L'OUTIL.....	59
VIII. ESTIMATION DU TEMPS NECESSAIRE POUR APPLIQUER LA METHODE	60
VIII. 1. ESTIMATION DU TEMPS DE RECHERCHE DES DONNEES.....	60
VIII. 2. ESTIMATION DU TEMPS DE PRISE EN MAIN ET D'UTILISATION.....	60
IX. CONCLUSION ET OUVERTURE	61
X. BIBLIOGRAPHIE	63
XI. GLOSSAIRE	64
XII. SOURCES SITES INTERNET	68
XIII. ANNEXES	69

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Chiffres clefs et implantation en France de NCA Environnement (Site NCA Environnement).....	12
Figure 2 : Figure illustrant la déconnexion écologique (Opsn -Seuils et barrages)	13
Figure 3 : Représentation d'un problème grâce à la logique nette (Modélisé sur le logiciel FisPro).....	16
Figure 4 : Représentation du même problème grâce à la logique floue (Modélisé sur du logiciel FisPro).....	16
Figure 5 : Schéma d'un système d'inférence floue (Site FisPRO.org).....	17
Figure 6 : Exemple de fonctions mathématiques pouvant être représenté sur FisPRO	17
Figure 7 : Représentation de l'entrée « Potentiel » sur FisPRO	17
Figure 8 : Représentation de l'entrée « Pluviométrie » sur FisPRO	18
Figure 9 : Représentation de l'entrée « Rendement » sur FisPRO	18
Figure 10 : Inférence du rendement à partir des données d'entrées et des règles d'inférence définies	19
Figure 11 : Combinaison des sorties de rendement pour le couple : potentiel de sol et pluviométrie.....	19
Figure 12 : Schéma de fonctionnement des passes à "jet de surface" (Site Cassiopée).....	20
Figure 13 : Schéma de principe illustrant la protection des passes contre les corps flottants	21
Figure 14 : Passe à poissons du barrage de Gray (70).....	22
Figure 15 : Passe à fentes verticales, originaire d'Amérique du Nord	22
Figure 16 : Passe à bassins successifs à fentes à Gamsheim 67 (Site Association Saumon-Rhin).....	22
Figure 17 : Schéma de fonctionnement des passes à "jet plongeant" (Source : site Cassiopée).....	22
Figure 18 : Passe à poisson à « jet plongeant » (ONEMA - 1992)	22
Figure 19 : Passe à "jet plongeant" sur le ruisseau du Fondagny (69)	23
Figure 20 : Schéma de fonctionnement des pré-barrages (hmf.enseiht.fr).....	24
Figure 21 : Coupe d'une passe en enrochements en rangées périodiques (Rapport GHAAPE - 2006)	24
Figure 22 : Passe à poissons de type pré-barrages située au pont du barrage de Vichy (03).....	25
Figure 23 : Rampe en enrochements périodiques à Kolbsheim (GHAAPE - 2006, p.35).....	25
Figure 24 : Rampe en enrochements périodiques (GHAAPE - 2006, p.6)	25
Figure 25 : Schéma d'un dispositif en enrochements régulièrement répartis (GHAAPPE - 2006, p.11).....	25
Figure 26 : Profil en travers MIKE ZERO d'une passe en enrochements régulièrement répartis sur la Gartempe à Busserais (86)	26
Figure 27 : Photographie avant/après de la rampe à enrochements régulièrement répartis de Marignier sur la Griffes (75).....	26
Figure 28 : Coupe longitudinale schématique d'une rampe en enrochements jointifs (GHAAPE – 2006)	27
Figure 29 : Rampe en enrochements jointifs sur la Dore à Thiers (Eurovia)	27
Figure 30 : Représentation schématique du champ de vitesse en 3 dimensions (Cours HSL 2016 - J. Vasquez, p. 26).....	27
Figure 31 : Profil en travers MIKE ZERO d'une rivière de contournement sur la Gartempe à Busserais (86)	28
Figure 32 : Rivière de contournement avec seuils à Avolsheim (Association Saumon-Rhin)	29
Figure 33 : Rivière de contournement sur le barrage de Strasbourg (Association Saumon-Rhin).....	29
Figure 34 : Rivière de contournement à Châtelais (ICEMA)	29
Figure 35 : ONEMA 1992, p.93	29
Figure 36 : Vue en perspective d'une passe à ralentisseurs plans (ONEMA - 2014, p.31).....	30
Figure 37 : Passe à ralentisseurs plans de Saint-Alban-Leysses en Savoie (73)	30
Figure 38 : Vue en perspective d'une passe à ralentisseurs de fond (ONEMA - 2014, p.31)	30
Figure 39 : Passe à ralentisseurs de fond (Association Saumon-Rhin).....	30
Figure 40 : Passe à anguille de type brosse (Valmont et de la Ganzeville)	30
Figure 41 : Passe à anguille type macro-plots (Projet HYDROSTADIUM EDF).....	30
Figure 42 : Structure de la logique du critère n°1	33

Figure 43 : Représentation du critère n°1 sur FisPRO	34
Figure 44 : Présentation des grands principes de franchissement des dispositifs.....	35
Figure 45 : Représentation du critère n°2 sur FisPRO	38
Figure 46 : Représentation du critère n°3 sur FisPRO	40
Figure 47 : Représentation du critère n°4 sur FisPRO	43
Figure 48 : Représentation du critère n°1 sur FisPRO	45
Figure 49 : Représentation du critère n°2 sur FisPRO	45
Figure 50 : Représentation du critère n°3 sur FisPRO	45
Figure 51 : Représentation du critère n°4 sur FisPRO	45
Figure 52 : Représentation de la variable de sortie "Choix PAP » sur FisPRO.....	46
Figure 53 : Présentation des cinq premières règles composant le moteur d'inférence	47
Figure 54 : Présentation des cinq premières règles inférées	47
Figure 55 : Présentation des règles floues 35 et 36	48
Figure 56 : Exemple de résultat de l'inférence.....	50
Figure 57 : Synthèse schématique des trois niveaux d'inspection (Guide VNF – 2008, p.50)	58
Figure 58 : Ensemble flou de forme triangulaire.....	67
Figure 59 : Présentation de la feuille EXCEL	88
Figure 60 : Présentation du support des données pour le critère n°1 sur EXCEL	88
Figure 61 : Exemple de mesure de la hauteur de chute sur Géoportail (Archive NCA 2017 - Sarthe).....	89
Figure 62 : Exemple de mesure de la hauteur de chute sur Géoportail (Barrage de Moncey – Doubs)	89
Figure 63 : Photographie aérienne du seuil à Busserais sur la Gartempe (cas modélisé durant mon TFE).....	90
Figure 64 : Exemple de mesure de l'emprise disponible sur Géoportail (Gartempe à Busserais)	90
Figure 65 : Présentation du support des données pour le critère n°2 et 3 sur EXCEL	90
Figure 66 : Photographie aérienne avec date de prise de vue (Gartempe à Busserais 86)	92
Figure 67 : Extrait de la Banque Hydro (QTVAR)	92
Figure 68 : Présentation du support des données pour le critère n°4 sur EXCEL	93
Figure 69 : Présentation du tableau récapitulatif des résultats des critères	93
Figure 70 : Présentation de l'outil d'estimation du coût du projet.....	94
Figure 71 : Schéma d'un système d'inférence floue (SIF)	94
Figure 72 : Présentation de l'interface du logiciel FisPRO.....	94
Figure 73 : Moteur d'inférence.....	95
Figure 74 : Correspondance entre fonctions mathématiques et ouvrages de franchissement.....	95
Figure 75 : Exemple de cas concret	95
Figure 76 : Exemple de cas concret	96
Figure 77 : Présentation de l'interface permettant de créer une entrée	96
Figure 78 : Résultat après la création du critère « essai » en entrée.....	96
Figure 79 : Règles FisPRO.....	97
Figure 80 : Résultat de l'inférence des règles floues.....	97

LISTE DES TABLEAUX ET DES EQUATIONS

Tableau 1 : Traduction des valeurs numériques en variables linguistiques.....	17
Tableau 2 : Traduction des valeurs numériques en variables linguistiques.....	18
Tableau 3 : Répartition des espèces piscicoles selon leurs capacités de nage et de saut	32
Tableau 4 : Caractéristiques hydrobiologiques des passes à poissons	33
Tableau 5 : Cas particuliers du critère n°2.....	36
Tableau 6 : Intervalles du critère n°2 associés à chaque dispositif de franchissement	37
Tableau 7 : Intervalles associés à chaque sous-ensemble flou (SEF) pour ce critère.....	38
Tableau 8 : Tableau récapitulatif des hauteurs de chute limite pour chaque passe	39
Tableau 9 : Récapitulatif des sensibilités de chaque passe à la variation de hauteur d'eau amont.....	42
Tableau 10 : Récapitulatif des variables linguistiques par critère pour chaque dispositif de franchissement	47
Tableau 11 : Présentation de deux cas concrets de règles du moteur d'inférence	49
Tableau 12 : Détail du choix du dispositif pour la règle n°26.....	49
Tableau 13 : Détail du choix du dispositif pour la règle n°49.....	49
Tableau 14 : Limite de la méthode	51
Tableau 15 : Tableau récapitulatif de la comparaison des propositions : cas concret et experts	52
Tableau 16 : Tableau récapitulatif de la comparaison des propositions : FisPRO et experts	53
Tableau 17 : Estimation du nombre de règle à caler.....	55
Tableau 18 : Tableau récapitulatif des coûts d'entretien.....	58
Tableau 19 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus sur les 10 cas étudiés	59
Équation 1 : Equation permettant de calculer le nombre de règle sur FisPRO.....	46
Équation 2 : Puissance volumique dissipée pour les passes à bassins.....	74
Équation 3 : Puissance volumique dissipée pour les passes « naturelles »	74
Équation 4 : Formule de Myer.....	92

Sigles et abréviations

AFB : Agence Française pour la Biodiversité.

DCE : Directive Cadre sur l'Eau. Directive 2000/60/CE.

DDT : Direction Départementale des Territoires.

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

ICE : Informations sur la continuité écologique.

INRA : Institut national de la recherche agronomique.

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques.

IRSTEA : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture.

LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques.

PAB : Passes à bassins construit en génie civil (béton armé).

RC : rivière de contournement

ROE : Référentiel des obstacles à l'écoulement

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

SANDRE : Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau.

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

SEF : Sous-ensemble-flou.

SIE : Système d'Information sur l'Eau

« Il n'existe pas un type de passe "miracle" plus efficace que tous les autres [...]. Il serait tentant de ranger les différents obstacles en plusieurs classes [...] et de proposer pour chacune d'elles et en fonction des espèces migratrices un type de passe approprié. La multiplicité des contraintes et des facteurs (d'ordre biologique, hydrologique, hydraulique, topographique...) fait que chaque situation est un cas d'espèce et l'expérience montre qu'une telle classification rigide est susceptible au contraire d'entraîner de grossières erreurs ou des coûts prohibitifs. »

Citation issue de l'ouvrage :

Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement

Rédigé en 1992 par M. LARINIER, J.P. PORCHER, F.TRAVADE, C. GOSSET (page 42)

I. DEFINITION DU SUJET

La thématique générale abordée au cours de ce stage est axée sur la problématique de la restauration de la continuité écologique (RCE) des milieux aquatiques. Cette composante est un élément clef permettant de qualifier l'état écologique des cours d'eau. Elle est introduite dans la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE) en 2000 puis transcrite dans le droit français en 2006 par la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA). La DCE fixe, pour les états membres, l'atteinte du bon état écologique (biologique et physico-chimique) et chimique des masses d'eau. L'atteinte de ce bon état passe notamment par un travail important sur la RCE. La DCE est mise en œuvre sur le plan national par des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) à l'échelle des bassins hydrographiques.

Le SDAGE du bassin Loire-Bretagne comporte un plan d'actions identifiant les mesures nécessaires à la restauration de la continuité écologique des cours d'eau avec des solutions types. Il définit également un ordre de priorité pour les mesures de restauration de la continuité écologique qui fait prévaloir l'effacement, puis l'arasement, puis l'ouverture de l'ouvrage et enfin l'aménagement de dispositif de franchissement ([Annexe 1](#)).

Lorsque l'abaissement n'est pas souhaité ou souhaitable pour des raisons de pérennité du site ou d'usages en particulier (navigation ou hydroélectricité par exemple), il est alors nécessaire d'implanter un dispositif de franchissement. NCA Environnement dispose d'un secteur spécialisé en hydraulique fluviale qui réalise des études axées sur la thématique de la restauration de la continuité écologique. L'entreprise m'a ainsi sollicité afin de construire un outil permettant d'apporter une plus-value à la fois en amont, lors des réponses aux appels-offres mais également dans le cadre des diagnostics préalables lors des études. L'outil permet aux utilisateurs d'effectuer une analyse rapide du site d'étude, ne nécessite pas de connaissances scientifiques particulières et permet de réaliser un pré-diagnostic du site. Un technicien peut donc utiliser la méthode en suivant la « Fiche procédure FisPRO » en [annexe 11](#). Cela permet au maître d'ouvrage de disposer un outil d'analyse et d'aide à la décision supplémentaire.

La problématique centrale de cette étude est la suivante. Est-il possible d'établir une méthode simple et synthétique permettant d'orienter un opérateur vers le(s) type(s) de passe à poissons semblant le(s) plus approprié(s) en fonction des caractéristiques d'un site d'étude ? L'enjeu est donc de parvenir à synthétiser et traduire les données scientifiques et techniques de dimensionnement afin de construire un outil d'analyse multicritère. Afin de répondre à cette problématique plusieurs éléments sont à définir. Quels sont les dispositifs de franchissement communément utilisés ? Quels sont les paramètres permettant de les caractériser et de les différencier ? Et quel dispositif de franchissement est le plus adapté au site d'étude ? Ensuite, il est nécessaire de définir des paramètres intrinsèques à l'ensemble des cas de figures potentiellement rencontrés et d'établir la méthode de comparaison adaptée.

L'outil développé doit également répondre aux attentes du bureau d'études et faciliter le travail d'ingénierie. Il est donc indispensable que l'outil soit fonctionnel et fiable. Pour cela, il est nécessaire de quantifier la précision et la robustesse de la méthode, ses limites et ses incertitudes ainsi que le temps nécessaire pour obtenir un résultat satisfaisant.

La première partie du rapport (parties II et III) présente le cadre de l'étude et définit le fonctionnement des outils utilisés. La deuxième (partie IV) établit une synthèse des connaissances portant sur les différents dispositifs de franchissements sélectionnés. La troisième partie (partie V) détaille la sélection et la construction des critères nécessaires à la création des outils. La quatrième partie (parties VI et VII) présente la méthode développée. La cinquième partie (partie VIII) présente une étude permettant d'estimer le temps nécessaire pour appliquer la méthode dans son ensemble. La dernière partie (partie IX) expose les principales conclusions et identifie les limites de l'étude ainsi que des pistes de recherches et de développements potentielles.

II. CADRE DU PROJET

II. 1. Présentation de l'entreprise

NCA environnement est un bureau d'études créé en 1988 par Philippe BOUTELLER et sous la direction d'Aymeric MINOT depuis décembre 2018. Les compétences de son équipe se développent continuellement pour apporter des solutions adaptées aux projets et aux territoires. Elles répondent à l'ensemble des enjeux techniques, économiques et environnementaux des collectivités locales et territoriales et des développeurs privés dans les domaines de l'assainissement, de l'eau, de l'agriculture, des milieux naturels et des énergies renouvelables.

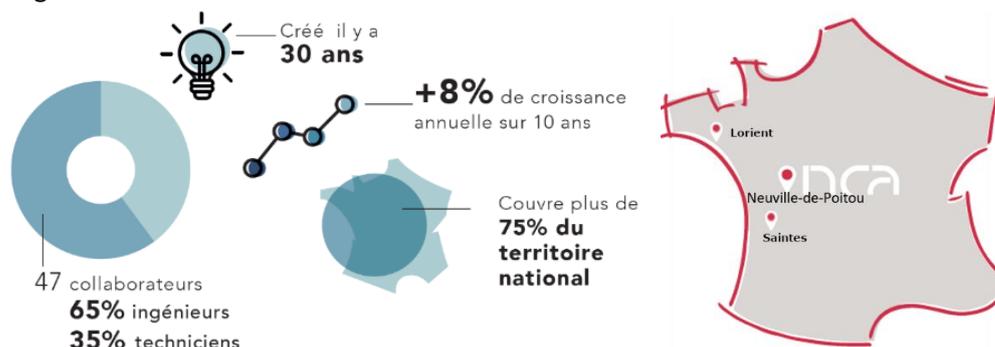


Figure 1 : Chiffres clés et implantation en France de NCA Environnement (Site NCA Environnement)

II. 2. Contexte réglementaire encadrant l'étude

La notion de continuité écologique peut être définie comme la libre circulation des organismes vivants et leurs accès aux zones indispensables à leurs reproductions, leurs croissances, leurs alimentations ou leurs abris, le bon déroulement du transport naturel des sédiments ainsi que le bon fonctionnement des réservoirs biologiques (d'après la définition de l'article R214-109 du code de l'environnement définissant un obstacle à la continuité écologique).

Le principe de préservation ou de restauration de la continuité écologique est reconnu et inscrit dans plusieurs textes réglementaires ou de planification, et cela à différentes échelles :

- Politique européenne :** Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Elle fixe comme objectif pour les états membres, l'atteinte du bon état des masses d'eau à l'horizon 2015 (avec de possible dérogation pour 2021 ou 2027). Celui-ci repose à la fois sur le bon état écologique (dépendant de paramètres biologiques et physico-chimiques) et sur le bon état chimique. L'annexe V de cette directive introduit la notion de continuité écologique comme élément de qualité pour la classification de l'état écologique des rivières.

La DCE est transcrite dans le droit français en 2006 par la LEMA.
- Déclinaison locale :** SDAGE et SAGE : La DCE est mise en œuvre sur le plan national par des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) à l'échelle des bassins hydrographiques. Il s'agit de documents de planification qui fixent pour 6 ans les orientations permettant d'atteindre les objectifs en matière de bon état des eaux. Le SDAGE est accompagné d'un programme de mesures définissant les actions opérationnelles à réaliser. Un complément d'information concernant le SDAGE du bassin Loire-Bretagne est présenté en annexe 1.

- **Contexte réglementaire national** : Loi Grenelle : La loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, dite loi Grenelle, instaure dans son article 29, la mise en œuvre du concept de trame bleue. Ce concept doit permettre de préserver et de remettre en bon état des milieux afin d'atteindre l'objectif du bon état d'ici 2015, avec en particulier une étude de l'aménagement des obstacles les plus problématiques pour la migration des poissons. A la suite de cela, un plan national de restauration de la continuité écologique des cours d'eau visant la préservation de la biodiversité a été présentée le 13 novembre 2009 par la secrétaire d'État en charge de l'écologie. Il établit un cadre pour la mise en œuvre d'actions de restauration sur les ouvrages impactant le plus la continuité piscicole et/ou sédimentaire : les « ouvrages Grenelle ».
- **Contexte réglementaire national** : Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) : La loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA), codifiée en partie à travers l'article L.214-17 du code de l'environnement, introduit d'autres éléments réglementaires en faveur de la protection et de la restauration de la continuité écologique des cours d'eau. Elle distingue deux listes afin de caractériser les besoins des cours d'eau et est présentée en annexe 1.

II. 3. État de l'art et guides de références des dispositifs de franchissement piscicole

Les passes à poissons sont des dispositifs permettant à l'ichtyofaune de franchir un obstacle créé par l'Homme sur un cours d'eau, tel qu'un barrage ou un seuil. L'ONEMA (actuel OFB) recense en 2015 plus de 60 000 seuils en France métropolitaine (source : portail ROE). Les usages de ces obstacles sont multiples (moulins, hydroélectricité, zone humide, plan d'eau, régulation de débits, etc...) mais ils ont tous pour objectif de maintenir un certain niveau d'eau en amont. Ces ouvrages, implantés au fil de l'eau, génèrent ainsi une rupture de la continuité piscicole et du transit sédimentaire.

Les conséquences environnementales induites par ces ouvrages ne sont pas négligeables puisque l'ensemble du cycle de vie des espèces piscicoles est impacté (reproduction, alimentation, repos, etc...). La faune aquatique ne peut plus se déplacer librement et la recharge sédimentaire aval est perturbée. D'autres impacts sont à déplorer. Les seuils et les plans d'eau perturbent les écoulements, l'eau « stagnante » est davantage réchauffée par les rayons du soleil ce qui engendre une augmentation de la température de l'eau. La dissolution de l'oxygène est en partie fonction de la température, l'eau est donc moins oxygénée ce qui a un impact sur la faune. Cela a pour conséquences une translation des espèces piscicoles vers l'amont et une disparition des espèces proches de la source puisque que les paramètres physico-chimiques sont dégradés. À terme, cela a pour conséquence d'appauvrir les habitats et la biodiversité et donc de déséquilibrer les biotopes.

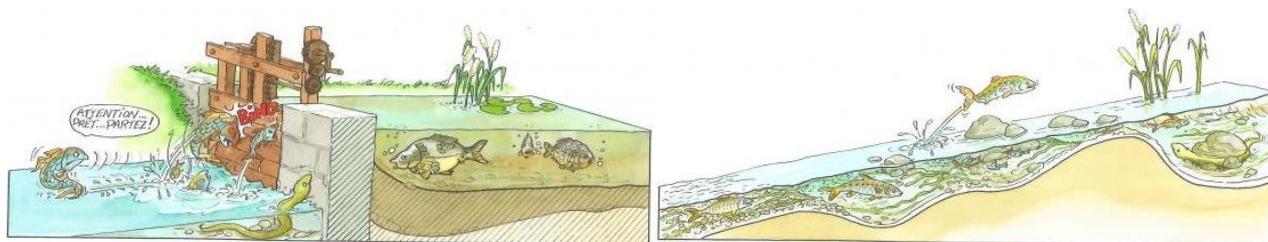


Figure 2 : Figure illustrant la déconnexion écologique (Opsn -Seuils et barrages)

Les passes à poissons sont d'abord testées en Belgique par Denil au début du XXe siècle afin d'enrayer le déclin des grands salmonidés. Les premières passes à avoir été étudiées, puis testées sur des maquettes (Denil 1936-1938) sont les passes à ralentisseurs [Partie IV.2.2.], notamment par Mcleod et Nemeny en 1940 aux États-Unis et par White et Nemenyi en 1942 en Grande-Bretagne. Ces passes ont ensuite été perfectionnées et largement diffusées par Larinier (1978) et Miralles (1981) en France, Sonneberg (1980) au Danemark, et par Rajaratnam et Katopodis (1984 et 1990) au Canada [Source : Wikipédia – Passes à poissons].

Avec la forte augmentation du nombre des grands barrages hydroélectriques, il a fallu utiliser d'autres solutions, notamment de type "ascenseur à poissons". Les « échelles » ou « passes » ont, depuis les années 1970, aussi été conçues comme mesure compensatoire ou conservatoire dans le cadre d'études d'impact, et d'enquêtes publiques obligatoires pour les grands barrages ou dans le cadre de « programmes de restauration en faveur des poissons migrateurs » et autres espèces [Source : Wikipédia – Passes à poissons].

En 1992, l'ONEMA publie un rapport intitulé Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement qui rassemble l'ensemble des connaissances disponibles sur le franchissement des barrages et seuils par les poissons migrateurs. L'ouvrage compile plus de dix années de recherche théorique et appliquée sur le sujet ainsi qu'une expérience française et étrangère appliquée sur plusieurs centaines d'ouvrages. Le rapport rassemble de précieuses informations techniques sur : les dispositifs de franchissement, les limites et rappels réglementaires, les facteurs biologiques, l'implantation des passes, la conception des projets, le suivi des chantiers, les coûts, les études sur modèles réduits et les techniques de contrôle. Les passes étudiées sont : les passes à bassins successifs, à ralentisseurs, à pré-barrages, les rivières artificielles, les écluses et ascenseurs à poissons et les passes à anguilles et à alose (Source : site Eau et Biodiversité – Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement).

En raison de son important réseau hydrographique et du grand nombre de barrages hydroélectriques, la France développe un groupement de recherche (GHAAPPE) soutenue par EDF. En 2006, le groupement GHAAPPE publie un guide intitulé Guide technique pour la conception des passes « NATURELLES » qui établit la synthèse des connaissances portant sur les écoulements à fortes pentes au-dessus de macro-rugosités en vue de la mise au point de passes à poissons dites « naturelles » [Partie IV.1.2.].

En 2014, l'ONEMA publie un guide complet sur l'évaluation du franchissement des obstacles à l'écoulement par les différentes espèces de poissons. Le guide a été conçu selon le protocole ICE (Information sur la Continuité Ecologique) pour les administrations, les acteurs de l'environnement, de l'eau et du territoire, les bureaux d'études, les chercheurs, les ingénieurs et les techniciens. L'ouvrage établit un rappel sur la continuité écologique, un énoncé des principes généraux du protocole ICE, un diagnostic de la franchissabilité à la montaison et un diagnostic préalable pour les obstacles équipés de dispositifs de franchissement piscicole [Source : site Hydraulicois – Guide ONEMA 2014].

Les trois ouvrages cités précédemment sont les principaux rapports et guides rédigés en France sur le franchissement des obstacles par les espèces piscicoles.

Les projets de rétablissement de la continuité écologique sont particulièrement complexes car ils font intervenir de nombreux acteurs, leurs attentes et usages particuliers ainsi que plusieurs disciplines scientifiques telles que l'hydrologie, l'hydraulique, l'hydrogéomorphologie, la biologie, le transport sédimentaire, le génie civil, mais également l'aspect réglementaire, social, etc...

Il n'existe actuellement aucun outil ou modèle permettant de traiter ce type de projet de manière automatisée. Il est systématiquement nécessaire de missionner une équipe d'experts spécialisés afin d'établir un diagnostic précis du site, conduisant à l'établissement de propositions d'aménagements (effacement, arasement, dispositifs) en adéquation avec les contraintes du site : contraintes structurelles, biologiques, attentes des acteurs, etc...

II. 4. Analyse multicritère

Les projets dans le domaine de l'environnement répondent généralement à des problématiques globales faisant intervenir de nombreux acteurs, disciplines et domaines de compétence.

Notre sujet s'inscrit dans cette démarche étant donné que la caractérisation des équipements dans le cadre de projet de reconnexion écologique fait intervenir de nombreux critères (écologiques, économiques, patrimoniaux, hydrologique, hydrauliques, topographiques, etc...).

Les méthodes d'aide à la décision multicritère se sont depuis quelques années largement répandues dans de nombreux domaines. Elles présentent l'avantage de prendre en compte différents facteurs ou objectifs dans le processus de décision. De plus, elles permettent d'orienter la réflexion vers un ensemble de solutions possibles ou envisageables et non sur une possibilité unique. Dans l'ouvrage, Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas rédigé par B. Roy et D. Bouyssou en 1993, ils précisent bien que :

« Dans un processus d'aide à la décision multicritère, le principal objectif n'est pas de découvrir une solution, mais de construire ou créer un outil considéré comme utile aux yeux d'un ou plusieurs acteurs prenant part au processus de décision. »

Néanmoins, ces méthodes présentent souvent l'inconvénient d'être obscures et peu lisibles aux yeux de l'utilisateur non initié. Cette étude s'attache à donner à l'utilisateur ou aux lecteurs les clefs de compréhension de la méthode mise en œuvre [La méthode multicritère - 2005, C. Martin et M. LEGRET].

II. 4. 1. Analyse multicritère : ensemble des actions potentielles

L'analyse multicritère peut apporter divers types d'aides :

- La comparaison des performances de solutions ou d'améliorations potentielles pour un même site ;
- L'étude de la performance d'un ouvrage au travers d'indicateurs de performance permettant de faire le suivi et éventuellement de juger de l'amélioration possible de l'ouvrage en termes de structure et de gestion ;
- La comparaison des performances de solutions en différents sites.

Dans le cadre de notre étude, l'analyse multicritère permettra de comparer les performances de solutions ou d'améliorations potentielles pour un même site. Il serait également possible de poursuivre et d'étoffer l'approche initiale en appliquant au sujet, la méthode de « deep learning » déjà incorporé au logiciel FisPRO. Cela permettrait au modèle de se corriger et de s'améliorer à partir de cas d'études concrets et fonctionnels. La partie concernant le « deep leaning » ne sera pas détaillé dans ce rapport mais pourra faire office ultérieurement d'une optimisation de la méthode développée.

II. 4. 2. Critère et famille cohérente de critères

Un critère est un outil permettant la comparaison de deux ou « n » situations selon un certain cadre, généralement représenté par une fonction à valeurs réelles. L'ensemble des critères forme une « famille cohérente de critères » si et seulement si les trois conditions suivantes sont vérifiées :

- Exhaustivité ou complétude : tous les critères pertinents doivent être pris en compte ;
- Non-redondance : cette condition consiste à interdire la présence de critères superflus [B. Roy et D. Bouyssou, 1993] ;
- Robustesse : tous les critères doivent former un ensemble cohérent qui aboutit à des résultats plausibles et incontestables.

II. 4. 3. Critère et logique

Le choix du type de critère est conditionné par le problème posé par les décideurs. Les critères peuvent être caractérisés par une logique nette ou par une logique floue. La logique nette sous-entend que l'on approche de la résolution du problème par le biais de « vrai-critères », dépourvus de marges d'erreurs. En revanche, la logique floue fait intervenir d'autres types de critères (quasi, pseudo ou pré-critères), caractérisés chacun par l'existence de marges d'erreurs [La méthode multicritère - 2005, C. Martin et M. LEGRET].

Ces deux types de logiques sont illustrés par les exemples ci-dessous :

- La logique classique (logique de Boole) n'admet pour les variables que la valeur 0 et 1.
 - Exemple figure 3 : les personnes âgées de moins de 30 ans sont définies comme étant jeunes et celles de plus de 50 ans comme étant âgées.
- La logique floue induit que les variables peuvent prendre des valeurs entre 0 et 1.
 - Exemple figure 4 : les individus âgés de 20 à 30 ans et de 50 à 60 ans sont dans une phase de transition. Cela permet de tenir compte du passage progressif de l'individu d'un âge à un autre. Ces variables sont alors définies par une fonction d'appartenance « u ».



Figure 3 : Représentation d'un problème grâce à la logique nette (Modélisé sur le logiciel FisPro)

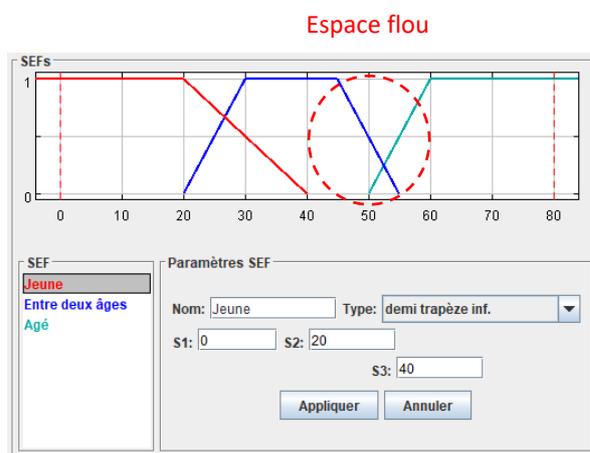


Figure 4 : Représentation du même problème grâce à la logique floue (Modélisé sur du logiciel FisPro)

Les analyses multicritère basé sur la logique nette et la prise en compte de poids associé à chaque critère peuvent être réalisées à la main. De nos jours, des logiciels comme ELECTRE III ou FisPRO ont été développés afin de faciliter la construction de la méthode, disposent d'une interface plus explicite et peuvent être améliorés. C'est pourquoi, nous avons décidé d'utiliser un outil déjà fonctionnel.

Le fonctionnement du logiciel FisPRO a été enseigné durant le cours d'Aide à la décision et analyse multicritère de Monsieur Amir Nafi en 3^e année à l'ENGEES. En approfondissant le sujet, nous avons considéré que le fonctionnement du logiciel était adapté à la problématique car FisPRO est basé sur les systèmes d'inférence floue et prend donc en compte les incertitudes associées aux critères. De plus, l'interface de présentation des résultats permet de sélectionner, rejeter et classer les différents dispositifs de franchissements.

Nota : ELECTRE III est également un outil d'analyse multicritère abordé en 3^e année à l'ENGEES. Cependant, celui-ci fonctionne sur la base de la logique nette et prend en compte des poids ou des pondérations mais ne permet pas de sélectionner ou de rejeter des dispositifs de franchissement, seulement de les classer.

III. LOGICIEL FISPRO : FUZZY INFERENCE SYSTEM PROFESSIONNAL

Le logiciel FisPro (Fuzzy Inference System Professionnal) a été développé initialement dans le cadre d'un projet de recherche (COST 2000-012) coordonné par l'association TRANSFERTS LR qui soutient les entreprises par l'innovation et le transfert de technologie.

FisPRO permet de créer des systèmes d'inférence floue (SIF) afin d'effectuer des raisonnements basés sur la simulation d'un système physique ou biologique. L'interface a également la capacité « d'incorporer à la logique floue des connaissances expertes et leurs nuances, et la possibilité d'exprimer le comportement d'un système en termes interprétables » [Source : site FisPRO].

Un système d'inférence floue est formé de trois blocs ou étapes :

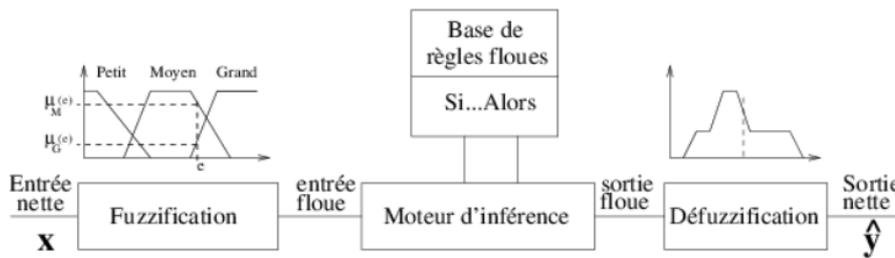


Figure 5 : Schéma d'un système d'inférence floue (Site FisPRO.org)

III. 1. Fuzzification

Le **premier bloc** correspond à l'étape de **fuzzification** qui transforme/traduit les valeurs numériques en degrés d'appartenance aux différents ensembles flous de la partition. Les ensembles flous de la partition correspondent à des variables linguistiques (Exemple : Faible, moyen, élevé) et assurent une correspondance avec l'univers numérique. Cela permet de simplifier la description d'un processus et d'éviter d'effectuer un traitement numérique.

La description des valeurs des variables linguistiques est traduite grâce à des fonctions mathématiques (fonctions d'appartenance) particulières afin de définir leurs domaine de définition (intervalle) et leurs prédominance (allure de la fonction) et de tenir compte du processus modélisé.

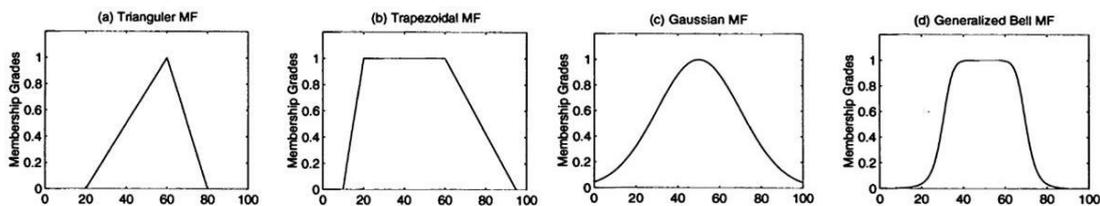


Figure 6 : Exemple de fonctions mathématiques pouvant être représenté sur FisPRO

Exemple de fuzzification : Prédiction du rendement à partir du potentiel agronomique du sol et de la pluviométrie (exemple issu du site ASPEXIT- La logique floue ou l'extension de la logique classique)

- Entrée n°1 : Potentiel agronomique du sol

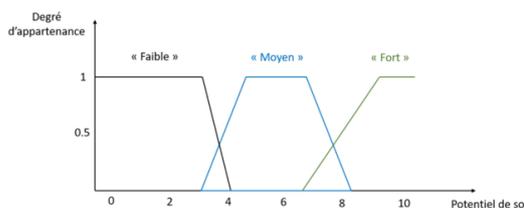


Figure 7 : Représentation de l'entrée « Potentiel » sur FisPRO

Valeurs numériques	Variables linguistiques
$4 \geq X$	Faible
$3 \geq X \geq 8$	Moyen
$X \geq 6,5$	Fort

Tableau 1 : Traduction des valeurs numériques en variables linguistiques

- Entrée n°2 : Pluviométrie

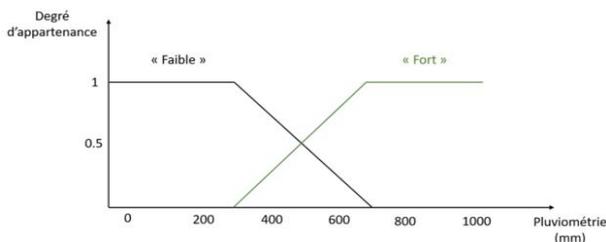


Figure 8 : Représentation de l'entrée « Pluviométrie » sur FisPRO

Valeurs numériques	Variables linguistiques
$700 \geq X$	Faible
$X \geq 300$	Fort

Tableau 2 : Traduction des valeurs numériques en variables linguistiques

- Sortie : Rendement

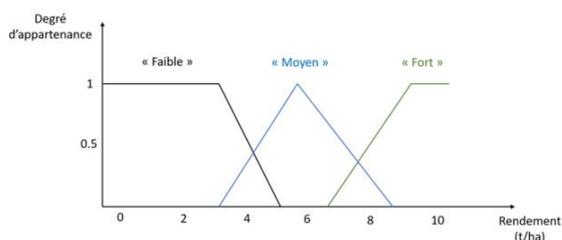


Figure 9 : Représentation de l'entrée « Rendement » sur FisPRO

Valeurs numériques	Variables linguistiques
$5 \geq X$	Faible
$3 \geq X \geq 8,5$	Moyen
$X \geq 6,5$	Fort

Tableau 3 : Traduction des valeurs numériques en variables linguistiques

III. 2. Moteur d'inférence

Le **second bloc** est le **moteur d'inférence**, il est formé de l'ensemble des règles floues qui constitue les « lois » caractérisant le modèle. Les valeurs des variables linguistiques, définies par des fonctions d'appartenance, sont liées entre elles par les règles. Ce maillage complexe de règles floues permet d'obtenir des résultats et de tirer des conclusions. Cette méthode est appelée la déduction floues ou l'inférence.

Nota : Il existe 2 opérateurs pour former les règles. « ET » qui synthétise la notion d'intersection par le minimum des degrés d'appartenance aux classes considérées et « OU » qui synthétisent la notion de réunion par le maximum.

Exemple de règles introduites dans le moteur d'inférence : Prédiction du rendement à partir du potentiel agronomique du sol et de la pluviométrie

- Règle 1 : Si le potentiel de sol est fort OU la pluviométrie est forte, ALORS le rendement est fort ;
- Règle 2 : Si le potentiel de sol est moyen, alors le rendement est moyen ;
- Règle 3 : Si le potentiel de sol est faible ET la pluviométrie est faible, ALORS le rendement est faible.

III. 3. Défuzzification

Enfin, le **dernier bloc** correspond à l'étape de **défuzzification**. Il permet d'inférer une valeur nette à partir du résultat de l'agrégation des règles. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification, les deux méthodes les plus utilisées sont la méthode moyenne des maximas (MM) et la méthode du centre de gravité (COG pour Center Of Gravity).

- La **méthode moyenne des maximas (MM)** consiste à calculer la moyenne des abscisses pour lesquels le degré d'appartenance est maximal. C'est une méthode restrictive étant donné qu'elle ne prend en compte que les maximas ;
- La **méthode du centre de gravité (COG)** consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la surface sous la courbe. C'est une méthode plus flexible puisqu'elle prend en compte l'ensemble des résultats de la sortie floue.

Exemple de défuzzification : Prédiction du rendement à partir du potentiel agronomique du sol et de la pluviométrie

Couple de données : Le potentiel agronomique du sol équivaut à 7 et la pluviométrie à 500 mm.

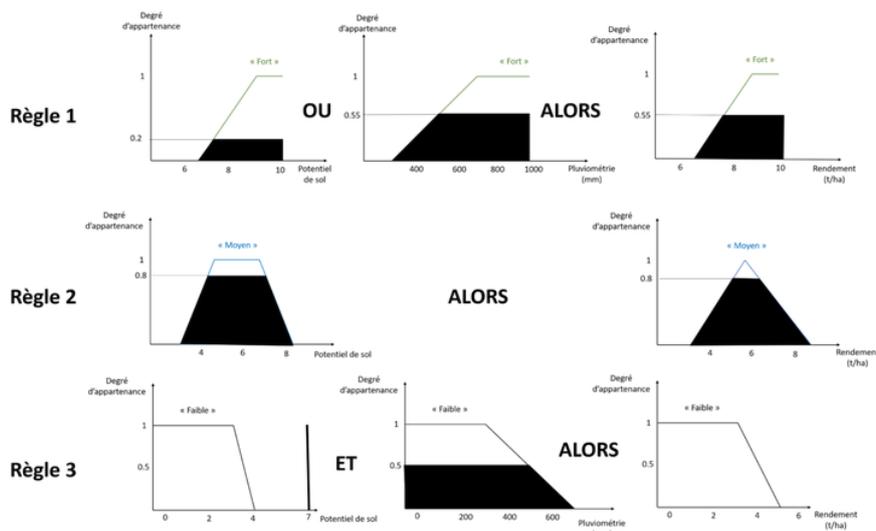


Figure 10 : Inférence du rendement à partir des données d'entrées et des règles d'inférence définies

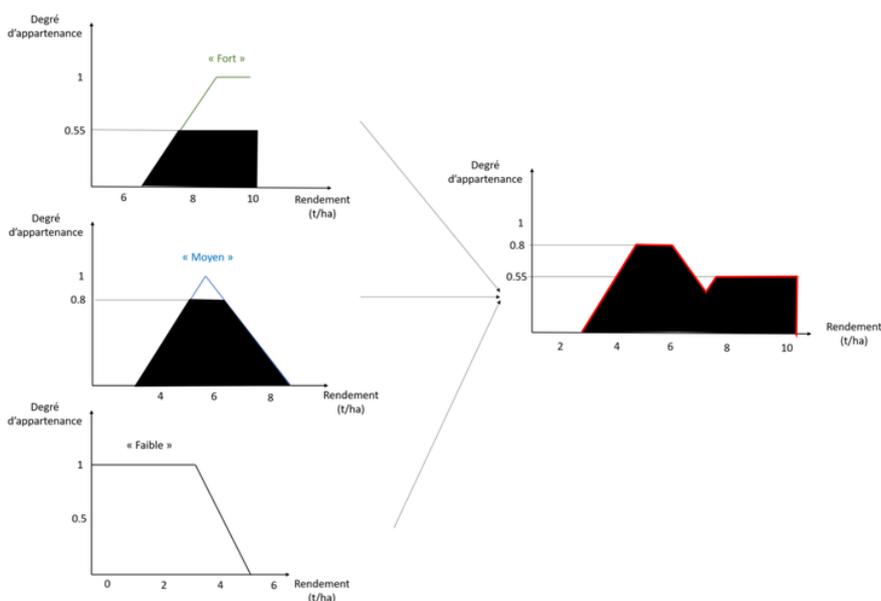


Figure 11 : Combinaison des sorties de rendement pour le couple : potentiel de sol et pluviométrie

Dans l'exemple ci-dessus (figure 11), la méthode des MM donne un résultat de :

$$X = 5 + \frac{(6,5 - 5)}{2} = 5,75 \text{ t/ha}$$

Dans l'exemple ci-dessus (figure11), la méthode des COG donne un résultat de :

$$X_G = \frac{\sum A_i \times y_i}{A_{total}} = 6,2 \text{ t/ha}$$

Un potentiel agronomique de 7 correspond à un intervalle moyen ou élevé. Une pluviométrie de 500mm à un intervalle faible ou élevé. Grâce aux règles introduites dans le moteur d'inférence et à l'étape de défuzzification, une valeur nette est obtenue. Selon la méthode utilisée le résultat diffère légèrement puisqu'on obtient 6 t/ha ± 5%.

IV. PASSES A POISSONS

Les passes à poissons sont des dispositifs permettant à l'ichtyofaune de franchir un obstacle d'origine anthropique sur un cours d'eau. Les barrages et les seuils ont des usages multiples mais ils ont tous pour objectif de maintenir un certain niveau d'eau amont. Ces ouvrages, implantés au fil de l'eau, génèrent une rupture de la continuité piscicole et du transit sédimentaire. Cela a de lourdes conséquences environnementales puisque la faune aquatique ne peut plus se déplacer librement et la recharge sédimentaire aval est perturbée. À terme, cela a pour conséquence d'appauvrir ou même de faire disparaître les habitats et la biodiversité et donc de déséquilibrer les biotopes.

Depuis le début du XX^{ème} siècle de nombreux dispositifs de franchissement ont été étudiés afin de proposer des solutions durables à ces problématiques. Cette partie synthétise les connaissances sur le sujet et précise les types de passes ayant été rejetées ou sélectionnées pour la suite de l'étude.

IV. 1. Passes à poissons sélectionnées

IV. 1. 1. Passes à bassins successifs

Le principe de la passe à bassins successifs consiste à diviser la hauteur de chute globale à franchir au droit de l'ouvrage en plusieurs chutes plus petites. Chaque chute est séparée de la précédente par un bassin permettant de dissiper l'énergie hydraulique. Le passage de l'eau d'un bassin à l'autre peut s'effectuer soit par des échancrures larges mais peu profondes (déversoirs), soit par écoulement à travers un ou plusieurs orifices aménagés dans la cloison séparant deux bassins, soit encore par écoulement par une ou plusieurs fentes ou échancrures profondes [ONEMA - 1992, p.86]. Il existe également des passes à bassins dites « mixte », couplant différents types d'écoulements afin d'améliorer la franchissabilité piscicole (exemple : écoulements par déversement au-dessus de la cloison et à travers un orifice noyé). Ces dispositifs « mixtes » n'ont toutefois pas été étudiés ici [ONEMA - 2014, p.152].

Le comportement hydraulique de la passe dépend des dimensions des bassins, des caractéristiques géométriques des cloisons (déversoirs, fentes, échancrures, orifices) et des cotes des niveaux d'eau à l'amont et à l'aval de l'ouvrage. Les passes à bassins ont donc une variabilité de forme et une modularité conséquente. Afin d'englober un maximum de cas, elles ne seront donc pas caractérisées par leurs dimensions ou leurs géométries mais en fonction de leurs écoulements qui déterminent quelles espèces piscicoles peuvent franchir l'ouvrage. Les 2 types de passe à bassins étudiées sont :

- Les passes à bassins successifs à « jet de surface »
- Les passes à « jet plongeant » sans orifices de fond et sans section de régulation amont

IV. 1. 1. 1. Passes à bassins successifs à « jet de surface »

Les passes à bassins successifs à « jet de surface » regroupent les passes munies de fentes ou d'échancrures latérales profondes. Dans ce mode d'écoulement, le jet qui se forme au niveau du rétrécissement de la cloison séparant deux bassins demeure en surface (fonctionnement hydraulique noyé). Son énergie se dissipe dans le bassin aval en créant de grandes zones de recirculation [ONEMA - 1992, p.88].

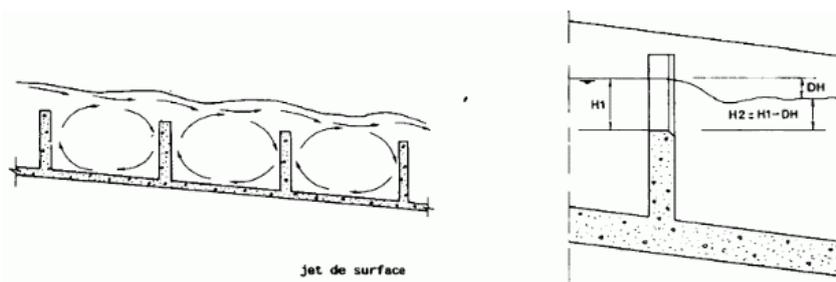
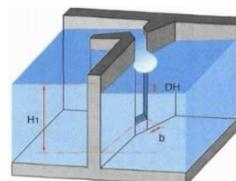


Figure 12 : Schéma de fonctionnement des passes à "jet de surface" (Site Cassiopée)

Caractéristiques des passes à bassins à « jet de surface » :

- Débit dans la passe et attractivité :

En raison de leurs fentes étroites et profondes (écoulement « pincé »), les passes à bassins à « jet de surface » ont des débits de fonctionnement limité généralement compris entre 0,2 m³/s et 0,7 m³/s [Guide VNF - 2008, p.26]. L'attractivité de la passe est donc limitée et nécessite souvent l'adjonction d'un débit d'attrait dans les cours d'eau à fort débit.



- Variations de hauteur d'eau amont et aval :

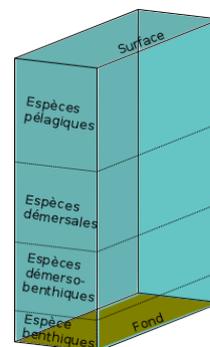
En raison de leurs écoulements pincés, les passes à bassins à « jet de surface » sont peu sensibles aux variations de hauteur d'eau amont lorsque les variations aval sont comparables. Le débit et le volume d'eau dans les bassins augmentent quasi-linéairement avec le niveau amont. Les vitesses et le niveau de turbulence demeurent donc sensiblement constants au sein des bassins [ONEMA - 1992, p.100].

Lorsque le niveau d'eau aval s'élève plus rapidement que le niveau amont le "noyage" de la passe, ou le "remous", se fait sentir d'autant plus en amont que les échancrures ou fentes sont étroites et profondes. Néanmoins, les effets des variations de la cote du plan d'eau aval se répartissent sur plusieurs bassins. Ce type de communication entre bassins est donc davantage apte à supporter les variations du niveau aval par rapport aux passes à « jet plongeant ». Lorsque le niveau aval augmente, l'attractivité de l'ouvrage est moins bien conservée que pour les passes à « jet plongeant ». Lorsque le niveau aval s'abaisse, la chute à l'entrée de la passe s'accroît moins vite que pour les passes à « jet plongeant ».

- Espèces piscicoles :

L'écoulement à « jet de surface » assure une bonne dissipation d'énergie, des zones de repos au sein des bassins et un gradient de vitesse conséquent. Les passes à « jet de surface » sont donc adaptées aux capacités de nage d'un large éventail d'espèces :

- Espèces benthiques évoluant au fond des cours d'eau ;
- Espèces pélagiques évoluant en pleine eau à proximité de la surface [Guide VNF - 2008, p.155] comme les cyprinidés rhéophiles et les salmonidés [ONEMA - 1992, p.88 et ONEMA - 2014, p.27].



- Embâcles :

A cause des fentes ou des échancrures étroites, les passes à bassins à « jet de surface » ont une grande sensibilité vis-à-vis des embâcles (corps flottants) et nécessitent un entretien récurrent pour rester fonctionnelles. Il est donc nécessaire, dans la plupart des cas, de mettre en place des systèmes de protection amont (dromes flottants, grilles à barreaux, écrans maçonnés ou en béton, rangées de rails, palplanches ou pieux battus) et éventuellement de couverture (caillebotis) [ONEMA - 1992, p.84].

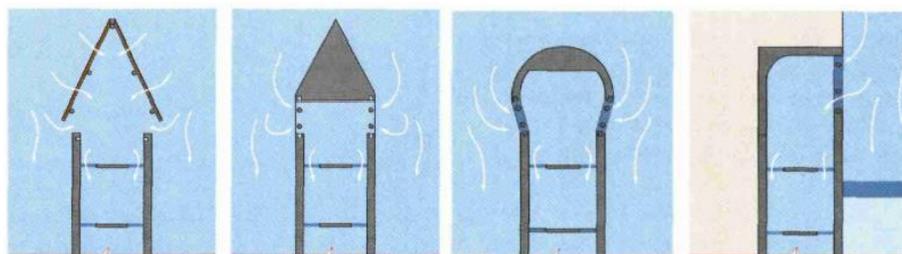


Figure 13 : Schéma de principe illustrant la protection des passes contre les corps flottants

- Insertion et modularité :

Ce concept de passe est parmi les dispositifs les plus compacts. Il présente une très bonne capacité d'insertion du fait de sa grande modularité et peut donc être implanté sur des sites présentant des hauteurs de chute allant jusqu'à plusieurs mètres. Néanmoins, en comparaison des passes « naturelles » ou des rivières de contournement, il présente une faible intégration paysagère [ONEMA - 2014, p.27].



Figure 14 : Passe à poissons du barrage de Gray (70)

Figure 15 : Passe à fentes verticales, originaire d'Amérique du Nord

Figure 16 : Passe à bassins successifs à fentes à Gamsheim 67 (Site Association Saumon-Rhin)

IV. 1. 1. 2. Passes à bassins successifs à « jet plongeant »

Les passes à bassins successifs à « jet plongeant » regroupent les passes munies d'échancrures peu profondes. Dans ce mode d'écoulement, le jet qui se forme au niveau de chaque « déversoir » plonge vers le fond du bassin. L'énergie est dissipée par mélange turbulent et par dispersion dans un ressaut situé au pied de la chute [ONEMA - 1992, p.87]. On rencontre ce type d'écoulement chaque fois que le niveau aval est situé en-dessous de la crête déversante (fonctionnement hydraulique dénoyé).

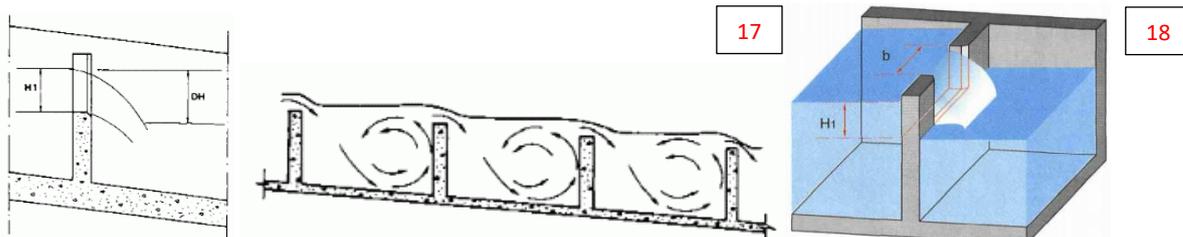


Figure 17 : Schéma de fonctionnement des passes à "jet plongeant" (Source : site Cassiopée)

Figure 18 : Passe à poisson à « jet plongeant » (ONEMA - 1992)

Caractéristiques des passes à bassins à « jet plongeant » :

- Débit dans la passe et attractivité :

Le débit de fonctionnement dans les ouvrages à « jet plongeant » est moins limité que pour les passes à bassins à « jet de surface » puisqu'il est généralement compris entre 1 et 5 m³/s. Ce concept permet donc de faire transiter des débits relativement importants, conférant ainsi au dispositif une bonne attractivité [Guide VNF - 2008, p. 28].

- Variations de hauteur d'eau amont et aval :

Dans le cas d'une passe à « jet plongeant » caractérisée par une partie déversante qui occupe une largeur importante de la cloison, toute augmentation du niveau d'eau amont se traduit par un accroissement très rapide du débit, de la turbulence et de l'aération dans les bassins [ONEMA - 1992, p. 100].

Les variations du niveau d'eau aval se concentrent au niveau de la dernière chute (chute aval). Ainsi, une élévation du niveau aval entraîne une diminution rapide de cette chute et une réduction importante de la vitesse et de l'attractivité du dispositif. A l'inverse, un abaissement du niveau aval a pour conséquence une augmentation de la chute qui peut alors devenir difficilement franchissable [ONEMA - 1992, p. 100].

- Espèces piscicoles :

L'écoulement à « jet plongeant » induit la présence d'une chute (notée ΔH sur la figure 17) comprise généralement entre 15 et 30 cm. Parfaitement adapté aux salmonidés, il n'est pas compatible pour le passage d'espèces benthiques [Guide VNF - 2008, p.28]. L'adjonction d'un orifice de fond est alors nécessaire pour garantir la montaison de ces dernières.

- Embâcles :

En raison de leurs échancrure larges et peu profondes, les passes à bassins à « jet plongeant » sont généralement des dispositifs peu sensibles aux embâcles et ne nécessitent donc que peu d'entretien pour rester fonctionnelles.

- Insertion et modularité :

Ce type de passe exige une emprise foncière plus conséquente et est moins modulable que les passes à bassins à « jet de surface » [Guide VNF - 2008, p.28]. Son implantation nécessite généralement un tracé rectiligne afin d'éviter que les jets ne heurtent trop violemment les parois interbassins, perturbent le comportement des migrateurs et compromettent l'efficacité de l'ouvrage [ONEMA - 1992, p.89].



Figure 19 : Passe à "jet plongeant" sur le ruisseau du Fondagny (69)

IV. 1. 2. Passes « naturelles »

Les passes « naturelles », aussi appelées passes « rustiques » englobent les dispositifs permettant de reproduire approximativement le fonctionnement d'un cours d'eau naturel. Leurs conceptions sont très variables, elles peuvent ainsi être implantées sur une partie du barrage (rampes) ou sur l'ensemble du cours d'eau (seuils).

IV. 1. 2. 1. Passes en enrochements en rangées périodiques ou pré-barrages

Les passes à poissons en enrochements périodiques et les pré-barrages ont des comportements hydrauliques, des zones d'implantations et des contraintes quasi-similaires. Ces deux ouvrages ont donc été regroupés en une même catégorie.

Ces dispositifs sont formés de plusieurs seuils créant au droit de l'obstacle une série de bassins qui fractionnent la chute à franchir et permettent aux espèces piscicoles de se reposer. Chaque seuil est muni de fentes profondes afin de permettre aux espèces benthiques ou aux espèces dépourvues de capacité de saut, de les franchir. Les jets formés au niveau de chaque espace inter-blocs se dissipent ensuite au sein des bassins artificiels.

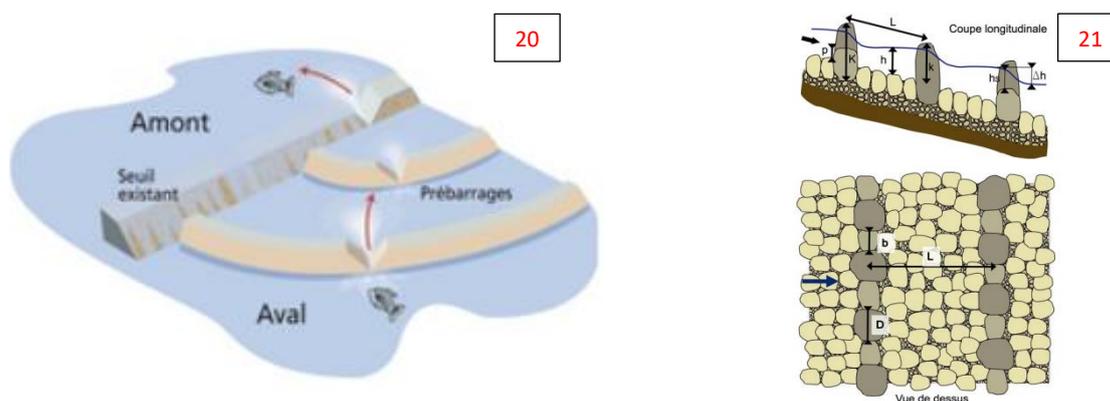


Figure 20 : Schéma de fonctionnement des pré-barrages (hmf.enseiht.fr)

Figure 21 : Coupe d'une passe en enrochements en rangées périodiques (Rapport GHAPE - 2006)

Caractéristiques des passes en enrochements en rangées périodiques ou pré-barrages :

- Débit dans la passe et attractivité :

Les pré-barrages sont susceptibles de faire transiter une forte proportion du débit de la rivière. Ils ont donc une bonne attractivité et ne nécessitent généralement pas l'adjonction d'un débit complémentaire. Cette attractivité se fait généralement au détriment du « confort » du poisson. De plus, les hauteurs de chute retenues sont généralement plus importantes que celles des passes à bassins successifs afin de limiter le nombre de pré-barrages et donc le coût.

- Variations de hauteur d'eau amont et aval :

Ce type de dispositif a, lorsque les blocs ne sont pas immergés, un fonctionnement hydraulique similaire aux passes à bassins classiques en béton armé (même principe de dimensionnement) :

- Lorsque les seuils des pré-barrages sont munis de fentes profondes, ils ont un fonctionnement à « jet de surface » (Partie IV.1.1.1.) ;
- Lorsque le débit du cours d'eau n'est pas suffisant pour maintenir une hauteur d'eau acceptable à l'amont des seuils et former des bassins avec des fentes profondes ou que les espèces piscicoles dimensionnantes disposent d'une capacité de saut alors des déversoirs sont aménagés. L'ouvrage adopte le même fonctionnement hydraulique que les passes à « jet plongeant » (Partie IV.1.1.1.).

Lorsque les blocs sont totalement immergés, le régime passe en torrentiel et un écoulement à forte vitesse se forme en surface. La couche sous-jacente, plus lente, est alors cisailée ce qui a pour incidence une perte de l'efficacité hydraulique des blocs [GHAPE - 2006, p. 18].

- Espèces piscicoles :

L'écoulement étant le plus souvent à « jet plongeant », la capacité de saut est nécessaire au franchissement de l'ouvrage. Les pré-barrages sont donc adaptés aux secteurs à salmonidés mais à éviter pour les cours d'eau à cyprinidés et à aloses. Ils sont également difficilement franchissables par les espèces benthiques sauf si les déversoirs sont remplacés par des fentes (« jet de surface ») ou par des mini-rampes rugueuses.

- Embâcles :

Ce dispositif est généralement peu sensible aux embâcles, les corps flottants bloqués dans les échancrures et fentes peu profondes peuvent être remobilisés en période de crues. Il nécessite donc peu d'entretien mais un suivi régulier.

- Insertion et modularité :

Ce type de passe s'adapte particulièrement bien aux seuils présentant un fort biais par rapport à l'axe du cours d'eau. Il peut également être implanté sans inconvénients sur toute la largeur aval du barrage (seuil). Néanmoins, ce dispositif est limité aux hauteurs de chutes inférieures à 2m en raison de la surface d'implantation conséquente et de la hauteur de chute limitée entre chaque bassin.



Figure 22 : Passe à poissons de type pré-barrages située au pont du barrage de Vichy (03)

Figure 23 : Rampe en enrochements périodiques à Kolbsheim (GHAAPPE - 2006, p.35)

Figure 24 : Rampe en enrochements périodiques (GHAAPPE - 2006, p.6)

IV. 1. 2. 2. Passes en enrochements régulièrement répartis

Dans une passe à enrochements régulièrement répartis, l'énergie est dissipée par les singularités constituées par les blocs isolés. Les blocs sont régulièrement répartis sur un coursier rugueux permettant d'obtenir un écoulement pseudo-uniforme dans tout le dispositif et d'éviter l'apparition de singularités hydrauliques marquées (chute locale, ressaut hydraulique trop prononcé, hauteur d'eau insuffisante) susceptibles de constituer des points de blocage à la remontée du poisson. Chaque bloc génère un sillage qui constitue une cache hydraulique pour les espèces piscicoles. La présence d'une rugosité de fond importante permet de diminuer les vitesses d'écoulements à proximité du fond et d'offrir des zones de repos et des repères aux petites espèces rhéophiles, ce qui facilite leurs montaisons [GHAAPPE - 2006, p.12].

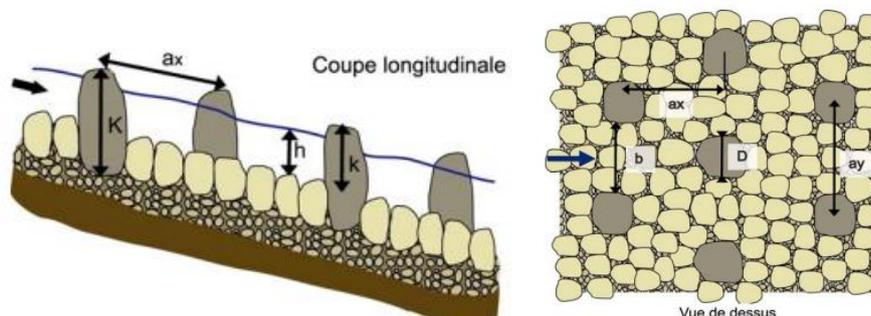


Figure 25 : Schéma d'un dispositif en enrochements régulièrement répartis (GHAAPPE - 2006, p.11)

Caractéristiques des passes en enrochements régulièrement répartis :

- Débit dans la passe et attractivité :

Ce dispositif peut être implanté contre l'une des berges ou sur une partie du barrage. Une portion notable du débit du cours d'eau peut donc transiter dans la rampe. L'ouvrage dispose ainsi d'une bonne attractivité et ne nécessite pas l'adjonction de débit complémentaire.

- Variations de hauteur d'eau amont et aval :

Le fonctionnement de ce dispositif dépend de la pente et de la submersion relative des blocs (rapport de la hauteur d'eau moyenne noté h sur la hauteur d'eau utile des blocs noté k). Tant que l'écoulement reste inscrit entre les blocs ($k \geq h$), l'ouvrage reste fonctionnel. Cependant lorsque les blocs sont immergés ($k < h$), l'écoulement se décrit comme une superposition de deux couches qui se cisailent. L'écoulement est alors perturbé et les blocs perdent de leur efficacité hydraulique [GHAAPPE - 2006, p.13].

De ce fait, l'augmentation du niveau d'eau amont n'a un impact sur l'ouvrage que lorsque les blocs sont envoyés. Le dévers (voir figure ci-dessous) permet de maintenir une hauteur d'eau suffisante entre les blocs à l'étiage sur la partie basse et une zone de blocs non totalement immergés en hautes eaux.

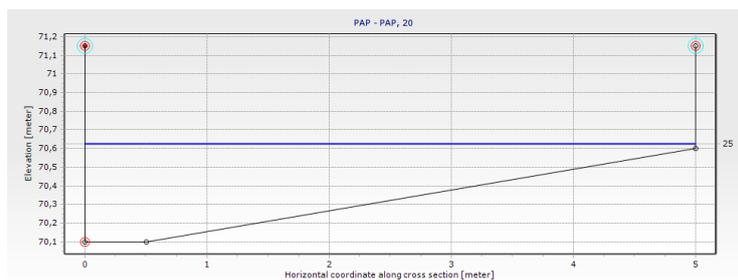


Figure 26 : Profil en travers MIKE ZERO d'une passe en enrochements régulièrement répartis sur la Gartempe à Busserais (86)

- Espèces piscicoles :

Si les critères hydrauliques conseillés (hauteur d'eau, vitesse et puissance dissipées) sont respectés la passe en enrochements régulièrement répartis est franchissable par toutes les espèces piscicoles [GHAAPPE - 2006]. Pour un même débit le couple hauteur d'eau, vitesse est variable en fonction des profils longitudinaux. Les espèces benthiques, pélagiques, rhéophiles et rhéophobes peuvent donc utiliser le dispositif.

- Embâcles :

Cette passe est généralement peu sensible aux embâcles étant donné que les corps flottants bloqués entre les blocs sont susceptibles d'être évacués en période de crues. Elle nécessite donc peu d'entretien mais un suivi régulier.

- Insertion et modularité :

Les passes en enrochements régulièrement répartis peuvent être implantés sur une partie du barrage ou contre les berges mais doivent conserver un tracé rectiligne afin d'éviter les phénomènes de turbulence. Elles sont donc adaptées à une hauteur de chute faible ou modérée (<3m).

L'ouvrage peut être dimensionné pour des pentes allant jusqu'à 5 %, l'emprise foncière reste donc relativement limitée. Le dispositif peut être composé de blocs naturels ou de blocs préfabriqués ce qui offre des possibilités d'intégration variées en milieu urbain ou rural [Guide VNF - 2008, p.33].



Figure 27 : Photographie avant/après de la rampe à enrochements régulièrement répartis de Marignier sur la Griffie (75)

IV. 1. 2. 3. Passes en enrochements jointifs

Les passes en enrochements jointifs sont constituées de blocs de dimensions relativement uniformes disposés les uns contre les autres, formant un coursier de pente variable (entre 3 et 10%). Ce dispositif utilise donc uniquement la rugosité du fond pour dissiper l'énergie.

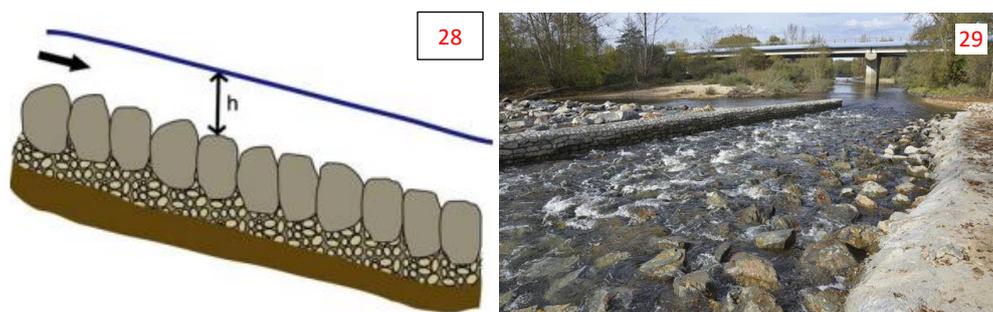


Figure 28 : Coupe longitudinale schématique d'une rampe en enrochements jointifs (GHAAPÉ – 2006)

Figure 29 : Rampe en enrochements jointifs sur la Dore à Thiers (Eurovia)

Caractéristiques des passes en enrochements jointifs

- Débit dans la passe et attractivité :

Ce dispositif peut être implanté contre l'une des berges ou sur tout ou une partie du barrage. Une portion notable du débit du cours d'eau peut donc transiter dans la rampe. L'ouvrage dispose ainsi d'une bonne attractivité et ne nécessite pas l'adjonction de débit complémentaire.

- Variations de hauteur d'eau amont et aval :

Ce dispositif est très sensible aux variations de hauteur d'eau amont puisque la dissipation d'énergie se fait uniquement grâce à la rugosité du fond et des parois. Ainsi lorsque la hauteur d'eau amont augmente, les vitesses et la turbulence augmentent considérablement ce qui limite le panel d'espèce piscicole pouvant franchir l'ouvrage.

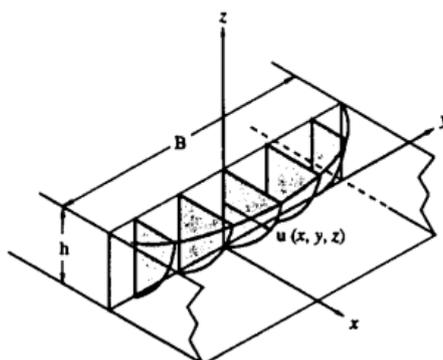


Figure 30 : Représentation schématique du champ de vitesse en 3 dimensions (Cours HSL 2016 - J. Vasquez, p. 26)

- Espèces piscicoles :

Le dispositif n'offre pas de zones de repos aux poissons de grande taille (saumons, truites de mer et alose). Cela implique que leurs franchissements doit s'effectuer d'une seule traite. Les rampes en enrochements jointifs ne doivent donc pas excéder les 10 à 20 m de longueur. Il offre néanmoins de petites caches hydrauliques aux petites espèces mais reste difficilement franchissable en raison des vitesses accrues au sein de l'ouvrage. La pente de la passe peut être limitée à 3 % afin de diminuer les vitesses d'écoulement mais cela a un impact direct sur la longueur de la passe. Les passes à enrochements jointifs sont donc limitées à des hauteurs de chutes faibles (< 1,5m).

- Embâcles :

Si la largeur est suffisamment conséquente, ce dispositif est très peu sensible aux embâcles étant donné qu'il n'y a pas de singularité pouvant en retenir.

- Insertion et modularité :

Les passes à enrochements jointifs peuvent être implantées sur une partie ou sur toute la longueur du barrage ou contre les berges mais doivent conserver un tracé rectiligne afin d'éviter les phénomènes de turbulence. Elles sont donc adaptées à une hauteur de chute faible (<1,5m).

L'ouvrage peut être dimensionné pour des pentes allant jusqu'à 5 % pour des hauteurs de chute faibles. L'emprise foncière reste donc relativement limitée. Ces dispositifs sont généralement composés d'enrochements maçonnés et ont donc une bonne intégration paysagère [Guide VNF - 2008, p.33].

IV. 1. 2. 4. Rivières de contournement

La rivière ou bras de contournement consiste à relier biefs amont et aval par un chenal à pente faible (1 à 2 %) positionné en berge. L'énergie est dissipée par rugosité du fond et des parois et dans certain cas par une succession de singularités (blocs, épis ou micro-seuils) [ONEMA - 1992, p. 120].

Caractéristiques des rivières de contournements :

- Débit dans la passe et attractivité :

Le débit pouvant transiter dans la rivière de contournement est limité puisqu'il dépend de la section du bras et donc de l'emprise foncière disponible. L'attractivité de la passe est donc restreinte pour les cours d'eau à fort débit et nécessite souvent l'adjonction d'un débit d'attrait.

- Variations de hauteur d'eau amont et aval :

En raison de sa section d'entrée hydraulique large, le bras de contournement est sensible aux variations de hauteur d'eau amont. Afin d'éviter l'augmentation du niveau d'eau et donc des vitesses dans la rivière, il est généralement envisagé d'équiper la section d'entrée d'un dispositif de régulation. Des rivières de contournement munies de banquettes avec dévers et/ou de talus à pente forte (1:1) peuvent également limiter ce phénomène. Ces solutions sont davantage préconisées et mise en œuvre en raison de leurs coûts moindres.

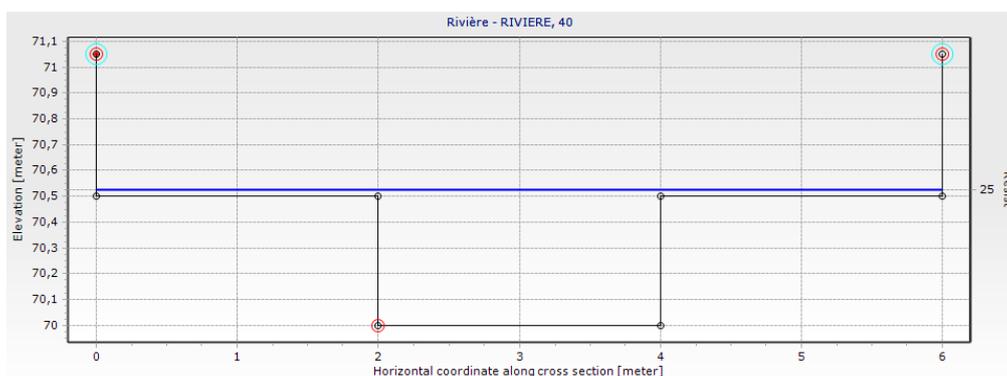


Figure 31 : Profil en travers MIKE ZERO d'une rivière de contournement sur la Gartempe à Busserais (86)

- Espèces piscicoles :

Les bras de contournement s'apparentent à des rivières naturelles. Si la hauteur d'eau est suffisante (minimum 40cm) et que les vitesses sont raisonnables, ils sont adaptés à toutes les espèces piscicoles.

- Embâcles :

Ce dispositif peut être sensible aux embâcles et nécessiter de l'entretien si la largeur de la section d'entrée hydraulique est faible, s'il est muni d'un dispositif de régulation à l'amont ou s'il comporte des micro-seuils ou des épis.

- Insertion et modularité :

Ce concept d'ouvrage de franchissement est, en raison de sa pente très faible, le moins compact. Il nécessite donc une emprise foncière importante étant donné qu'il est très long et relativement large. Cependant, si la surface d'implantation disponible est suffisante, ce dispositif peut être adapté à une large gamme de hauteur de chute, de moins d'un mètre à une dizaine de mètres.

Les bras de contournement s'intègrent parfaitement dans les paysages naturel et urbain. De plus, ce type d'ouvrage peut être multi-usages et constituer à la fois un dispositif de franchissement pour les poissons migrateurs et un parcours d'eau vive pour les canoës, les kayaks ou les rafts.



Figure 32 : Rivière de contournement avec seuils à Avolsheim (Association Saumon-Rhin)

Figure 33 : Rivière de contournement sur le barrage de Strasbourg (Association Saumon-Rhin)

Figure 34 : Rivière de contournement à Châtelais (ICEMA)

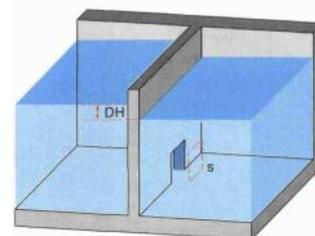
IV. 2. Passes à poissons rejetées

Les passes citées dans cette partie ne sont pas étudiées et incorporées dans notre outil d'aide à la décision en raison de leurs fonctionnements contestés ou plus limités, de leurs applications trop spécifiques ou parce que le bureau d'études NCA Environnement n'est jamais sollicité pour ce type d'étude.

IV. 2. 1. Passes à bassins successifs à orifices de fond

D'après l'ouvrage Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement produit par l'ONEMA en 1992, les passes à orifices noyés sans chute ont peu d'intérêt et sont rarement utilisées. Leur entretien est difficile (obturation fréquente des orifices) et leur débit a tendance à diminuer en crue lorsque la chute globale au niveau de l'obstacle diminue ce qui a pour conséquence de diminuer l'attractivité. De plus, le poisson a généralement des difficultés à trouver l'orifice situé au fond du bassin. Elles sont par ailleurs à proscrire pour l'aloïse. Les orifices sont généralement couplés à un autre type de dispositifs comme les passes à « jet plongeant » [ONEMA - 1992, p.104].

Figure 35 : ONEMA 1992, p.93



IV. 2. 2. Passes à ralentisseurs

Le principe de la passe à ralentisseurs est de disposer, dans un canal rectiligne à pente relativement forte et de section rectangulaire, des déflecteurs sur le fond et/ou sur les parois afin de réduire les vitesses moyennes de l'écoulement. Le dispositif crée des courants secondaires hélicoïdaux qui génèrent des transferts intenses de quantité de mouvement et permettent de dissiper l'énergie au sein de l'écoulement [ONEMA - 1992, p. 128].

D'après les retours d'expérience du bureau d'études et le rapport ICE de l'ONEMA publié en 2014 les passes à ralentisseurs sont peu fonctionnelles, réservées à des cas trop spécifiques et très rarement mises en application.

L'inconvénient principal de ce dispositif est qu'il ne présente pas de zone de repos, les poissons doivent donc franchir l'ouvrage d'une seule traite. Des bassins de repos peuvent être intercalés dans la rampe mais ils augmentent considérablement l'emprise foncière.

L'écoulement au sein de la passe est également fortement turbulent et les vitesses ainsi que l'aération sont importantes. De ce fait, seules les espèces d'eau courante de grandes tailles (salmonidés, lamproies marines, barbeaux...) peuvent l'emprunter. Ils sont également sensibles aux variations de niveau d'eau amont et au colmatage [Guide VNF - 2008, p. 30].

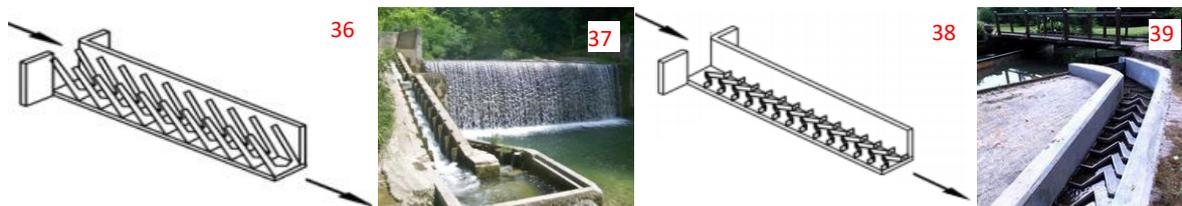


Figure 36 : Vue en perspective d'une passe à ralentisseurs plans (ONEMA - 2014, p.31)

Figure 37 : Passe à ralentisseurs plans de Saint-Alban-Leyse en Savoie (73)

Figure 38 : Vue en perspective d'une passe à ralentisseurs de fond (ONEMA - 2014, p.31)

Figure 39 : Passe à ralentisseurs de fond (Association Saumon-Rhin)

IV. 2. 3. Passes à anguilles

L'anguille a un développement biologique complexe passant du stade larvaire au stade adulte dans différents milieux. Elle dispose donc d'une capacité de nage qui augmente avec sa taille mais qui reste relativement faible. C'est pourquoi, afin de garantir sa montaison, des passes spécifiques basées sur sa capacité de reptation sont implantées (revêtement de type brosse ou macroplots) lorsque sa présence est avérée.

Nota : les anguilles sont également capables d'emprunter les passes standards en longeant les parois lorsque les vitesses d'écoulements le permettent ou en nageant dans le fond.



Figure 40 : Passe à anguille de type brosse (Valmont et de la Ganzeville)

Figure 41 : Passe à anguille type macro-plots (Projet HYDROSTADIUM EDF)

IV. 2. 4. Passes à ascenseurs et à écluses

Les passes à ascenseurs et à écluses sont mises en place sur des barrages présentant un espace disponible réduit et une hauteur de chute conséquente (>10m). Ils ne sont donc pas pris en compte au sein de cette étude car ce sont des ouvrages trop spécifiques et rarement étudiés par le bureau d'études.

V. CRITERES

Afin de construire l'outil d'aide à la décision multicritère sur FisPRO, différents critères représentatifs des cas d'étude ont été conçus. Les critères ont été sélectionnés dans l'objectif de simuler la réflexion que peut avoir un expert face à un site d'étude particulier. Quatre critères ont été retenus afin de caractériser une situation rencontrée. Pour chaque critère, une analyse critique est présentée en complément des éléments concernant sa construction et de sa traduction sur FisPRO.

De nombreuses précisions concernant l'acquisition des données nécessaires et l'utilisation des supports Excel et FisPRO développés sont détaillées dans la « *Fiche protocole FisPRO* » en annexe 11.

V. 1. Critère n°1 : Espèces piscicoles dimensionnantes

V. 1. 1. Définition et objectif du critère

L'objectif de ce critère est de regrouper les différentes espèces piscicoles dimensionnantes en fonction de leur capacité à pouvoir emprunter et franchir un type de passe à poissons donné.

Les ouvrages de franchissements ont des fonctionnements et des caractéristiques hydrauliques différentes. Certains disposent par exemple d'une importante diversité d'écoulement et/ou de zone de repos et/ou d'une lame d'eau conséquente, d'autres passes non. Les espèces piscicoles ont également des aptitudes qui diffèrent comme la vitesse de nage et/ou endurance, la capacité de saut, etc...

Le premier critère permet donc de déterminer le ou les types de passes à poissons franchissables par chaque espèce piscicole.

V. 1. 2. Construction du critère

Le premier critère a été construit grâce à la nomenclature Groupe d'espèces piscicoles ICE établie par le SANDRE et grâce à l'ouvrage Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons : Principes et méthodes - Information sur la continuité écologique réalisé par l'ONEMA en 2014.

Un tableau récapitulatif caractérisant les espèces piscicoles dimensionnantes a ainsi été produit. Celui-ci répertorie pour chaque espèce piscicole : le groupe ICE, la capacité de saut ou non, les vitesses de nage en m/s (minimum, moyenne et maximal), la hauteur de saut en mètres ainsi que les périodes de frai, de montaison et de dévalaison.

Afin de franchir une passe, un poisson a principalement besoin d'une endurance adaptée à l'ouvrage, d'une vitesse de nage suffisante, d'une capacité de saut si nécessaire et que le dispositif dispose d'une bonne attractivité et d'une lame d'eau suffisante. En utilisant le tableau présenté en annexe 3, les espèces piscicoles ont été regroupées en fonction de certaines caractéristiques biologiques. Les propriétés retenues sont :

- La capacité et la hauteur de saut : propre aux espèces (exemple : salmonidés) ;
- La capacité de nage du poisson : dépend de plusieurs facteurs [ONEMA - 1992] :
 - L'endurance qui correspond au temps durant lequel le poisson peut soutenir une vitesse de nage donnée. Cette propriété dépend de la longueur, de la morphologie de l'espèce et de la température de l'eau (solubilité de l'oxygène) ;
 - L'activité qui correspond à la durée durant laquelle un poisson peut maintenir une vitesse donnée (activité de croisière, de pointe ou de nage soutenue).

Le critère n°1 a été construit à partir des vitesses de nage moyennes et de la capacité de saut des poissons. Les espèces piscicoles ont ainsi été réparties en 4 groupes distincts présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Répartition des espèces piscicoles selon leurs capacités de nage et de saut

Groupes	Caractéristiques	Propriétés	Espèces piscicoles dimensionnantes	Groupe ICE
1	-Vitesse moyenne de nage élevée -Capacité de sauter	Vmoy > 3 m/s Hauteur de saut min. > 0,3 m	Saumon atlantique, truite de mer ou de rivière, mulets, ombre commun	1,2, 4, 6
2	-Vitesse moyenne de nage élevée -Ne saute pas	Vmoy > 2,5 m/s	Grande alose, alose feinte, lamproie marine et fluviale, aspe, brochet, barbeau fluviatile, chevesne, hotu, carpe commune, brème commune, sandre, brème bordelière, ide melanote, lotte, perche, tanche, vandoise	3, 5, 6, 7, 8
3	-Faible vitesse de nage moyenne -Ne saute pas	2,5 m/s > Vmoy > 1 m/s	Ablette commune, spirilin, barbeau méridional, blageon, carassin commun, carassin argenté, gardon, rotengle, toxostome, apron, chabot, lamproie de Planer, goujon, grémille, loche franche, loche de rivière, able de Heckel, bouvière, épinoche, épinochette, vairon	9 et 10
4	-Très faible vitesse de nage moyenne -Ne saute pas	Vmoy = 1 m/s	Anguillettes et anguilles jeunes	11

Les espèces du groupe 4 regroupent les anguilles sous toutes ses formes (Groupe ICE 11). Elles ont été mentionnées dans le tableau ci-dessus mais ne sont pas considérées dans l'étude étant donné qu'elles ont des capacités de nage trop contraignantes et trop limitées (reptation). Dans le cas où leurs présences sont avérées dans un cours d'eau, des dispositifs spécifiques peuvent être aménagés comme des brosses à anguilles ou des micro-plots (rugofish).

À partir des caractéristiques de fonctionnement des passes et les capacités de franchissement des espèces piscicoles, une analyse permettant de déterminer le ou les types de passes à poissons franchissables par chaque espèce piscicole est effectuée :

- Les pré-barrages, les passes à enrochements régulièrement répartis ainsi que les passes à bassins à « jet de surface » ne nécessitent pas de capacité de saut pour être franchis et disposent d'une gamme de vitesses étendues et diversifiées. Les bassins et les enrochements peuvent également faire office de cache hydraulique afin de permettre aux poissons de se reposer. Ils sont donc franchissables par les espèces des groupes 1,2 et 3 ;
- Les rivières de contournement ont des écoulements moins diversifiés que les passes citées précédemment. Elles sont relativement longues en raison de leur pente faible de l'ordre de 1 à 2 % maximum ce qui limite les vitesses d'écoulement dans l'ouvrage. De plus, si les variations de hauteur d'eau amont sont raisonnables ou si le bras est muni d'un ouvrage de régulation, les vitesses restent faibles. Il est également possible d'ajouter des micro-seuils ou des enrochements pour créer des zones de repos. Elles sont donc franchissables par les groupes 1,2 et 3 ;
- Les passes à enrochement jointifs ont une faible diversité d'écoulement et ne disposent pas de cache hydraulique permettant aux poissons de se reposer. Elles sont également très sensibles aux variations de hauteur d'eau amont ce qui augmente rapidement la vitesse d'écoulement au sein de la passe. Elles sont donc, de façon générale, difficilement franchissables par les espèces ayant de faibles capacités de nage. Elles ne nécessitent néanmoins pas de capacité de saut pour être franchies. Elles sont donc franchissables par les espèces des groupes 1 et 2 ;

- Les passes à bassins à jet plongeant dépourvues d'orifice de fond, nécessitent obligatoirement la capacité de sauter pour être franchies. Les espèces du groupe 1 sont donc les seuls à pouvoir utiliser ce type de passe.

Tableau 4 : Caractéristiques hydrobiologiques des passes à poissons

Dispositifs de franchissement	Capacité de saut	Diversité des écoulements	Caches hydrauliques	Groupe
Rivières	Non	Moyen	Moyen	1, 2, 3
Pré-barrages	Non	Élevé	Élevé	1, 2, 3
Passes en enrochements régulièrement répartis	Non	Élevé	Élevé	1, 2, 3
Passes en enrochements jointifs	Non	Faible	Faible	1,2
PAB à « jet de surface »	Non	Élevé	Élevé	1, 2, 3
PAB à « jet plongeant »	Oui	Faible	Moyen	1

V. 1. 3. Acquisition de la donnée

Les données nécessaires pour quantifier le résultat de ce critère peuvent être obtenues grâce au CCTP ou aux documents annexes de l'offre émis par le maître d'ouvrage. Si l'étude ne détaille pas les espèces cibles, il est possible d'avoir un complément d'information dans les Documents techniques d'accompagnement des classements pour le bassin... du SDAGE de la région (ex : Loire Bretagne ou Seine Normandie) ou sur la plateforme NAIADES EAU France (Code Sandre : 4).

Nota : La méthode est détaillée plus précisément dans la « Fiche protocole FisPRO » en annexe 11.

V. 1. 4. Traduction du critère sur FisPRO

Le tableau récapitulatif présenté ci-dessus établi pour chaque passe le ou les groupes d'espèces pouvant le franchir. Afin de traduire ce critère sur FisPRO, il est nécessaire de déterminer la « structure de la logique » du critère, le domaine de définition de chaque groupe et l'allure des fonctions.

Pour des questions de représentations sur FisPRO, il est considéré que si l'ouvrage est franchissable par le groupe 3 (ne saute pas et vitesse faible), il est également franchissable par le groupe 2 (ne saute pas et vitesse rapide) et par le groupe 1 (saute et vitesse rapide). Cette représentation est globalement cohérente mais néglige néanmoins la taille des espèces et établit l'hypothèse qu'il est rare de rencontrer des espèces de grandes tailles dans des petits cours d'eau (faible hauteur d'eau et faible débit). Les espèces des groupes 1 et 2 sont considérées comme rapides, donc d'une taille conséquente puisque la vitesse de nage dépend en partie de la taille de l'espèce. Cette représentation implique que les espèces plus massives peuvent également emprunter les ouvrages de franchissement des espèces du groupe 3.

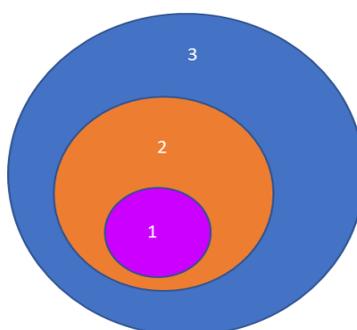


Figure 42 : Structure de la logique du critère n°1

Le choix et le dimensionnement d'une passe à poissons doivent impliquer que toutes les espèces piscicoles cibles soient capables de franchir l'obstacle. Ainsi, le groupe ayant les caractéristiques les plus limitantes (groupe ayant la valeur la plus grande) est dimensionnante.

De ce fait, si la liste des espèces piscicoles cibles présente :

- Une ou plusieurs espèces du groupe 3, l'ouvrage devra obligatoirement permettre le franchissement des espèces 3. Les espèces du groupe 1 et 2 pourront également emprunter l'ouvrage de franchissement étant donné qu'elles ont des capacités de nages plus importantes ;
- Aucune espèce du groupe 3 mais une ou plusieurs espèces du groupe 2. L'ouvrage devra obligatoirement permettre le franchissement des espèces du groupe 2. Cela implique que le groupe 1 pourra également franchir l'obstacle ;
- Uniquement des espèces du groupe 1. L'ouvrage ne devra pas obligatoirement permettre le franchissement des espèces des groupes 2 et 3.

Étant donné que les 3 groupes sont distincts et qu'aucune incertitude n'est prise en compte durant la construction du critère, une logique nette est adoptée. Chaque groupe est donc représenté grâce à des fonctions portes. Les valeurs ne pouvant donc varier qu'entre 0 et 1 en ordonnée. Si l'intervalle est sélectionné celui-ci vaut 1 et s'il ne l'est pas, il vaut 0.

La valeur renseignée sur FisPRO pour ce critère est 1,2 ou 3. Le domaine de définition de la fonction est compris entre 0 et 4. Les fonctions de chaque groupe sont centrées sur leur valeur plus et moins 0,5 (Exemple : Groupe 1 définit sur l'intervalle 0,5 à 1,5 centré sur 1).

La capture d'écran ci-dessous présente les différentes fonctions du critère n°1 modélisées sur le logiciel FisPRO :

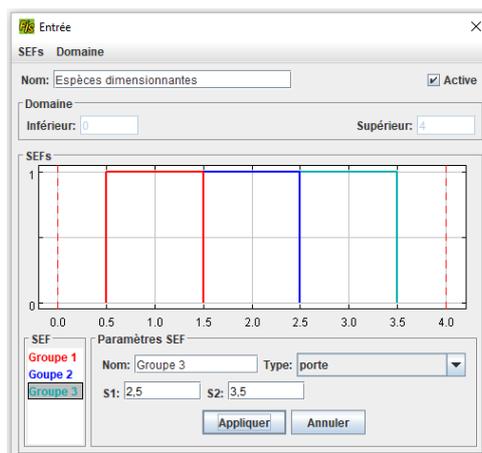


Figure 43 : Représentation du critère n°1 sur FisPRO

V. 1. 5. Analyse critique et incertitude du critère

La méthode employée pour construire ce critère est globalement robuste. Un des paramètres pouvant interférer sur les résultats est la qualité de la donnée initiale. Si la base de données utilisée pour déterminer les espèces piscicoles dimensionnantes est obsolète ou si la pêche électrique n'est pas représentative de l'effectif du cours d'eau ou de l'effectif recherché, ce critère et l'étude en général n'auraient aucun sens puisqu'ils proposeraient des dispositifs inadapés au site.

Néanmoins, il est difficile de s'assurer de la véracité de la donnée sans une connaissance approfondie de la région ou sans une étude poussée des espèces piscicoles présentes sur le site.

V. 2. Critère n°2 : Surface d'implantation disponible par rapport à la hauteur de chute maximale

V. 2. 1. Définition et objectif du critère

L'objectif d'une passe à poissons est de garantir le franchissement piscicole d'un ouvrage empêchant la continuité écologique au sein d'un cours d'eau (déconnexion verticale). Pour rétablir cette continuité, le dispositif doit s'adapter aux capacités de l'espèce piscicole dimensionnante (capacité de saut, de nage et endurance).

Pour ce faire, la hauteur de chute est répartie sur une longueur plus conséquente (voir tableau ci-dessous). Deux méthodes sont généralement utilisées : soit fragmenter la chute en plusieurs chutes plus petites, soit réaliser des rampes à pente variable mais relativement faible. Le dispositif doit également limiter les vitesses des écoulements afin de garantir la montaison. Il est alors possible de limiter la pente de l'ouvrage et/ou d'incorporer un moyen de dissiper l'énergie (bassins, rugosité de fond et de parois, blocs, etc...).

Chaque ouvrage de franchissement piscicole à, d'après la bibliographie, des contraintes de dimensionnement et des plages de fonctionnements spécifiques. **L'objectif de ce critère est de regrouper les différents dispositifs de franchissements en fonction de la surface d'implantation nécessaire pour permettre aux espèces piscicoles de franchir une hauteur de chute donnée et ainsi prendre en compte les contraintes foncières de chaque site.**

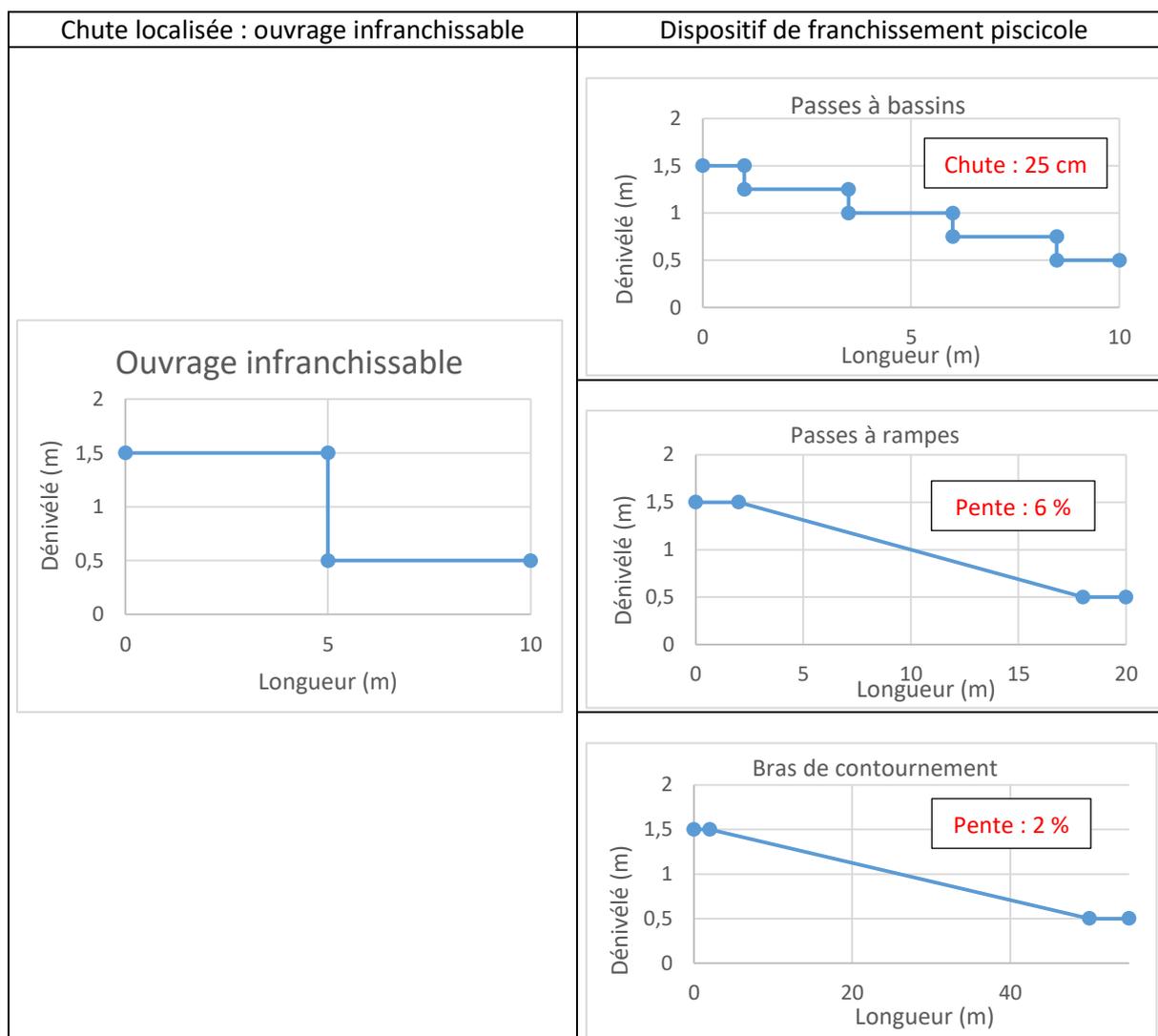


Figure 44 : Présentation des grands principes de franchissement des dispositifs

V. 2. 2. Construction du critère

V. 2. 2. 1. Élaboration de la formule

Ce critère se définit comme la surface nécessaire à l'implantation d'une passe à poissons fonctionnelle permettant aux espèces piscicoles cibles de franchir une hauteur de chute donnée. Le critère est donc indirectement lié à la pente admissible de chaque dispositif puisque la surface nécessaire évolue de façon inversement proportionnelle à la pente :

$$Surface = Longueur \times Largeur = \frac{H \text{ chute}}{Pente} \times Largeur$$

Ce critère se base sur la formule présentée ci-dessous mais ne prend pas en compte la pente future du projet étant donné que c'est un paramètre difficile à obtenir en phase esquisse et sans données topographiques :

$$Critère \ n^{\circ}2 : \frac{Surface}{Hauteur \ de \ chute} = \frac{Largeur \ disponible \times Longueur \ disponible}{Hauteur \ de \ chute}$$

Le calcul du critère n°2 est ensuite optimisé afin de prendre en compte la taille du cours d'eau à l'amont de l'ouvrage car certaines passes « naturelles » peuvent être implantées sur toute la largeur du cours d'eau. Dans ce cas de figure, comme la largeur d'implantation est très importante, la surface nécessaire est surestimée et le calcul du critère n°2 est faussé. Ainsi, lorsque la largeur du cours d'eau est supérieure à 5m et que la largeur disponible pour l'implantation est supérieure à 3m, la largeur disponible est arrondie à 5m (cas a).

L'amélioration de la méthode de calcul a également pour objectif de privilégier les passes « naturelles » au détriment des passes à bassins lorsque les cours d'eau ont un lit mineur inférieur à 5 mètres en augmentant les surfaces et donc les résultats du critère (cas c). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Cas particuliers du critère n°2

Caractéristiques	Largeur disponible > 3 m	Largeur disponible < 3 m
Largeur du cours d'eau > 5 m	Cas a : $\frac{5 \times Longueur}{Hauteur \ de \ chute}$	Cas b : $\frac{Largeur \ disponible \times Longueur}{Hauteur \ de \ chute}$
Largeur du cours d'eau < 5 m	Cas c : $\frac{5 \times Longueur}{Hauteur \ de \ chute}$	Cas d : $\frac{Largeur \ disponible \times Longueur}{Hauteur \ de \ chute}$

Nota : Ces conclusions sont issues d'une étude menée sur des cas concrets, présentée en détail en [annexe 6](#).

V. 2. 2. 2. Étude sur 42 cas concrets

Le dimensionnement des ouvrages de franchissement dépend de nombreux paramètres tels que la pente, la puissance dissipée, la vitesse d'écoulement, la hauteur d'eau, la modularité, etc... Il semble donc difficile de quantifier les variations de chacun des paramètres de façon globale, de déterminer leurs impacts sur le dimensionnement et donc sur la surface d'implantation de la future passe. De plus, rappelons que l'outil se veut d'être simple et rapide d'utilisation et ne doit pas nécessiter d'étude poussée. Il est par exemple, laborieux de déterminer la pente du futur dispositif de franchissement sans données topographiques.

Ainsi, afin d'obtenir les variations du critère pour chaque passe à poissons, 42 cas concrets d'ouvrage de franchissements en fonctionnements et fonctionnels ont été étudiés. Les 42 cas présentés en [annexe 6](#) englobent les différents types de passes. Pour chaque passe des sites très diversifiés d'un point de vue morphologique et hydraulique ont été sélectionnés afin de traiter un large panel de cas et de rendre le critère le plus robuste possible. Les intervalles des différents dispositifs sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : Intervalles du critère n°2 associés à chaque dispositif de franchissement

Dispositifs de franchissement	Surface / Hauteur de chute (m ² /m)	
	Minimum	Maximum
Rivières	130	600
Pré-barrages	80	150
Passes en enrochements régulièrement répartis	70	140
Passes en enrochements jointifs	50	100
PAB à « jet de surface »	5	70
PAB à « jet plongeant »	5	70

Nota : L'unité du critère se définit comme étant la surface nécessaire (en m²) pour chaque type de passe pour permettre aux espèces piscicoles de franchir un mètre de chute.

L'étude menée sur les différents cas concrets a permis d'établir plusieurs conclusions :

- La complexité du dimensionnement, la multitude de paramètres et la variabilité des sites engendrent une disparité importante des résultats pour une même passe ;
- Le critère est directement lié à la pente admissible de l'ouvrage ;
- 3 groupes semblent se dessiner : les rivières de contournement ayant des résultats supérieurs à 130 m²/m, les passes « naturelles » entre 50 et 150 m²/m et les passes à bassins avec des valeurs inférieures à 70 m²/m ;
- Il y a des intervalles de chevauchements entre les différents groupes. Ils correspondent à des zones où plusieurs types de passes peuvent être implantés. Exemple : entre 130 et 150 m²/m, il est possible d'implanter des rivières, des pré-barrages ou des passes en enrochements régulièrement répartis. La logique floue est donc parfaitement adaptée pour représenter la variabilité ou « l'incertitude » liées aux différents intervalles du critère.

Le critère permet donc de regrouper les ouvrages de franchissement en 3 ensembles afin de les comparer :

- Les rivières de contournements qui nécessitent une surface importante pour être implantées afin de conserver une pente de 1 à 2 % et une largeur suffisante pour permettre la diversification des écoulements (banquette ou dévers) ;
- Les passes « naturelles » regroupant les passes en enrochements jointifs, en enrochements régulièrement répartis et en enrochements de rangées périodiques (pré-barrages). Ces dispositifs ont des pentes comprises entre 1 et 10 % et des largeurs très variables (une partie ou la totalité du seuil ou sur la berge) ;
- Les passes à bassins regroupant les passes à « jet plongeant » et « jet de surface » ayant une bonne modularité, des pentes d'implantation pouvant aller jusqu'à 20 % et des surfaces de bassins limitées.

V. 2. 3. Acquisition de la donnée

Les données nécessaires pour quantifier le résultat de ce critère peuvent être obtenues grâce au CCTP, aux documents annexes de l'offre émis par le maître d'ouvrage, grâce à la plateforme Géoportail ou à la plateforme de Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (ROE) disponible en libre accès sur internet. Des données préalablement mesurées sur le site d'étude sont néanmoins plus précises et permettent d'obtenir des résultats plus cohérents.

Nota : La méthode est détaillée plus précisément dans la « Fiche protocole FisPRO » en [annexe 11](#).

V. 2. 4. Traduction du critère sur FisPRO

Les résultats obtenus à partir de l'analyse des 42 cas concrets ont permis de construire 3 groupes. L'objectif de cette sous-partie est de traduire les valeurs numériques obtenues en variables linguistiques afin de les introduire sur FisPRO. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer les intervalles de chaque groupe et l'allure des fonctions.

D'après les résultats obtenus grâce à l'analyse des cas concrets, chaque « groupe » est caractérisé par :

- Un intervalle où les passes du groupe doivent prévaloir sur les autres, pour ce critère. Cet intervalle est caractérisé par une fonction linéaire et horizontale ;
- Un ou deux intervalles plus ambigus, modélisés par la logique floue. Ces intervalles traduisent les incertitudes du critère et induisent que plusieurs groupes de passes peuvent être adaptés. Les autres critères permettront ensuite d'infirmer ou de confirmer la pertinence de la ou des passes sélectionnées.

C'est pourquoi, afin de représenter ces caractéristiques sur FisPRO des fonctions trapézoïdales ou demi-trapézoïdales ont été choisis. À partir du tableau 7 et du calage du modèle présenté dans la partie VI., les fonctions présentées dans le tableau ci-dessous ont été construites pour chaque groupe :

Tableau 7 : Intervalles associés à chaque sous-ensemble flou (SEF) pour ce critère

Dispositifs de franchissement	Minimum grande base	Minimum petite base	Max petite base	Maximum grande base
Rivières de contournement	130	200	500	-
Passes « naturelles »	40	80	120	150
Passes à bassins	-	0	20	70

La capture d'écran ci-dessous présente les différentes fonctions du critère n°2 sur le logiciel FisPRO. L'axe des abscisses est en écriture scientifique ($\times 10^2$) :

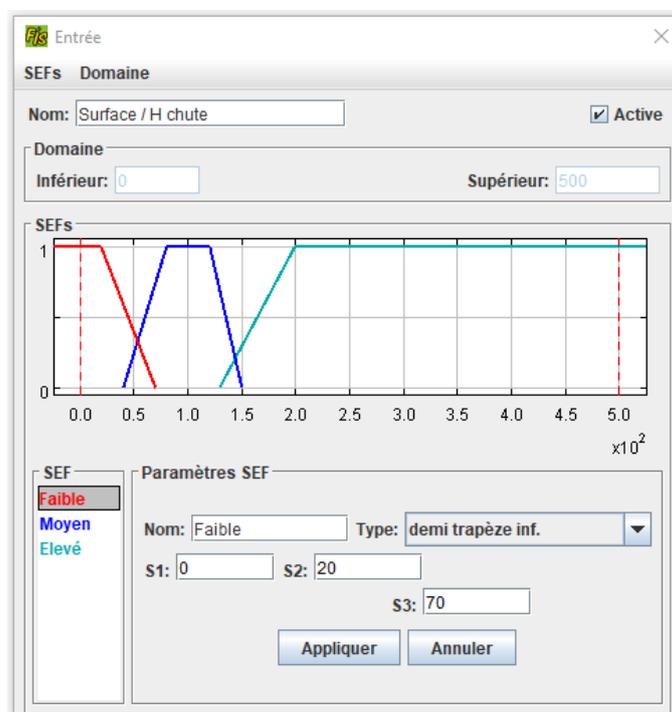


Figure 45 : Représentation du critère n°2 sur FisPRO

V. 3. Critère n°3 : Hauteur de chute

V. 3. 1. Définition et objectif du critère

L'objectif de ce critère est de déterminer la hauteur de chute maximale admissible pour chaque dispositif de franchissement piscicole afin d'écarter les passes non appropriées au site d'étude à partir d'un paramètre simple à obtenir.

V. 3. 2. Construction du critère

La construction de ce critère s'est principalement basée sur une étude bibliographique ([1], [2] et [3]). Chaque point est détaillé dans la section « Insertion et modularité » réalisé pour chaque passe dans la partie IV.1. du rapport. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous. Celui-ci présente la hauteur de chute maximale pour chaque passe et les paramètres limitant l'implantation de ce type de passe sur une hauteur de chute plus conséquente.

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des hauteurs de chute limite pour chaque passe

Dispositifs de franchissement	Paramètres limitants	Hauteur de chute maximale	Groupe (variable linguistique)
Rivières	Surface foncière disponible (pente)	< 10m	2 (Élevé)
Pré-barrages	Surface foncière disponible, nombre de pré-barrages (coût)	< 2-3m	1 (Faible)
Passes en enrochements régulièrement répartis	Surface foncière disponible (longueur)	< 2m	1 (Faible)
Passes en enrochements jointifs	Longueur (zone de repos, pente)	< 2m	1 (Faible)
PAB à « jet de surface »	-	< 10m	2 (Élevé)
PAB à « jet plongeant »	Surface foncière disponible (dimension des bassins, modularité)	< 2m	1 (Faible)

Les passes à bassins à « jet de surface » disposent d'une bonne modularité et sont très compactes, elles peuvent donc équiper les seuils d'une dizaine de mètres. Les rivières ou bras de contournement peuvent également être implantés sur des chutes d'une dizaine de mètres à condition d'avoir suffisamment d'espace disponible.

Les autres passes sont limitées à 2-3 mètres de hauteur de chute pour des raisons de coût, de modularité ou de fonctionnement hydraulique. Les caractéristiques de chaque ouvrage de franchissement sont détaillées dans la section « Insertion et modularité » de la partie IV.1. du rapport.

V. 3. 3. Acquisition de la donnée

Les données nécessaires pour quantifier le résultat de ce critère peuvent être obtenues grâce au CCTP, aux documents annexes de l'offre émis par le maître d'ouvrage, grâce à la plateforme Géoportail ou à la plateforme de Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (ROE) disponible en libre accès sur internet. Des données préalablement mesurées sur le site d'étude sont néanmoins plus précises et permettent d'obtenir des résultats plus cohérents.

Nota : La méthode est détaillée plus précisément dans la « Fiche protocole FisPRO » en [annexe 11](#).

V. 3. 4. Traduction du critère sur FisPRO

À partir de l'étude bibliographique, 2 groupes sont identifiés. Le 1^{er} groupe englobe les passes pouvant être implantées sur des ouvrages présentant des chutes d'une hauteur maximale de 2 ou 3m : les pré-barrages, les passes en enrochements régulièrement répartis et en enrochement jointifs et les passes à bassins

à « jet plongeant ». Le 2^e groupe est composé des passes à bassins à « jet de surface » et des rivières de contournement pouvant équiper des ouvrages présentant des hauteurs de chute plus importantes.

À présent, l'objectif est de traduire les valeurs numériques obtenues en variables linguistiques afin de les introduire sur FisPRO. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer l'allure des fonctions.

Si la hauteur de chute est inférieure à 1,5 mètre les passes du groupe 1 sont privilégiées et si elle est supérieure à 3 mètres ce sont celles du groupe 2 qui sont prioritaires. Entre 1,5 et 3 mètres, les dispositifs des 2 groupes peuvent être utilisés. Les 2 fonctions ont donc été représentées à l'aide de demi-trapèze. La figure ci-dessous présente la représentation du critère n°3 sur FisPRO :

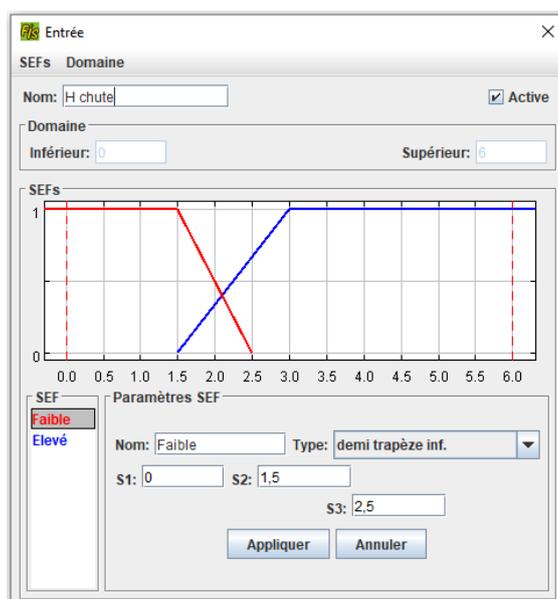


Figure 46 : Représentation du critère n°3 sur FisPRO

A noter que les passes du groupe 2 peuvent, d'après la bibliographie, également être implantées sur des ouvrages présentant des chutes inférieures à 2 mètres. Cependant, pour des raisons de représentation sur le logiciel FisPRO, le critère a été construit de cette façon. La suite du rapport présentera les règles floues du moteur d'ingérence qui prend en compte l'ensemble des critères et qui permet d'orienter les résultats.

V. 3. 5. Analyse critique et incertitude du critère

Ce critère est efficace étant donné qu'il permet à partir d'une seule donnée d'entrée de trier les différentes passes. Cependant, si cette unique mesure est imprécise ou obsolète cela peut avoir un impact non négligeable sur le résultat. Si la mesure est effectuée sur Géoportail, la précision est de $\pm 20\text{cm}$. De plus, la mesure est effectuée un jour précis et n'indique donc pas la hauteur de chute maximale, souvent observée en période d'étiage. Pour finir si le cours d'eau est étroit est qu'il y a de la ripisylve, la mesure sur Géoportail est impossible.

Ce critère pourrait être amélioré afin de prendre en compte davantage de cas de figure. Par exemple, les cours d'eau à faible débit (débit médian ou module inférieur à $1\text{ m}^3/\text{s}$) et à faible largeur ($< 3 - 5\text{ m}$) avec un obstacle engendrant une faible hauteur de chute ($< 0,5\text{ m}$). Ce cas est particulier mais relativement fréquent, il serait pertinent de pouvoir le traiter de manière spécifique. Il est actuellement caractérisé par le modèle de la même manière qu'une chute de 1 ou 1,5 mètre alors que dans le cas d'une hauteur de chute de 0,5 mètre certaines passes devraient être privilégiées comme les passes à enrochements jointifs ou les prébarrages. Dans ce cas de figure, d'autres solutions pourraient être envisagées comme de l'effacement avec de la recharge granulaire. Pour incorporer ce cas au modèle, il serait nécessaire d'ajouter un sous-ensemble flou (SEF) supplémentaire comme « Très faible ». Cependant, cet ajout augmenterait considérablement le nombre de règles à caler, ce qui est chronophage. Cela pourra faire office d'une optimisation.

V. 4. Critère n°4 : Variation de la hauteur d'eau amont

V. 4. 1. Définition et objectif du critère

Les sites d'études ont généralement des fonctionnements hydrauliques différents. Ces variations dépendent de plusieurs paramètres comme l'hydrogéomorphologie et les débits caractéristiques du cours d'eau, la taille du bassin versant ou encore l'inclinaison du seuil. Ainsi, en fonction du site d'étude la hauteur d'eau à l'amont du seuil varie plus ou moins au cours de l'année.

Les dispositifs de franchissement ont également une sensibilité vis-à-vis des variations de hauteur d'eau à l'amont du seuil qui leur est propre. Une variation de hauteur d'eau à l'amont de l'ouvrage engendre généralement une augmentation des débits, de la turbulence, de la puissance dissipée et de l'oxygénation ce qui peut rendre la passe infranchissable. **L'objectif de ce critère est donc de déterminer la variation de hauteur d'eau amont que chaque dispositif peut tolérer avant que cela ne nuise à son fonctionnement hydraulique et à la franchissabilité piscicole pour chaque site d'étude.**

V. 4. 2. Construction du critère

Dans un premier temps, il a fallu déterminer la sensibilité des 6 passes vis-à-vis des variations de hauteur d'eau amont. Les retours d'expérience ainsi que l'étude des rapports bibliographiques ([1], [2] et [3]), ont permis de déterminer la sensibilité de chaque dispositif de franchissement. Chaque point est détaillé dans la section « Variations de hauteur d'eau amont et aval » réalisé pour chaque passe dans la partie IV.1. du rapport.

Une passe à poissons est dimensionnée pour être fonctionnelle pour une gamme de débits précise allant généralement du débit d'étiage (QMNA5 ou 1/10^e du module) au débit de hautes eaux annuelles (entre 2 et 3 fois le module). La différence entre ces 2 valeurs correspond donc à la variation de hauteur d'eau à l'amont du seuil. Afin de quantifier cette variation de façon simple et rapide avec peu de paramètres d'entrées, une loi de seuil est appliquée sur l'ouvrage.

Deux méthodes sont proposées, la première est basée sur une loi de seuil classique avec un coefficient de seuil fixé à 0,42 [J. VASQUEZ et M. DUFRESNE - 2016, p.83]. La seconde méthode permet de caler le coefficient de débit grâce à un solveur afin d'avoir des résultats plus précis. Le détail des données nécessaires et de la méthode permettant de calculer ce critère est présenté en [annexe 11](#).

$$Q = Cd \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}}$$

Q : débit du cours d'eau (m³/s)

Cd : Coefficient de débit, généralement égale à 0,42 d'après la bibliographie

g : accélération de la pesanteur à la surface de la Terre (m/s²)

b : Longueur de la crête du seuil (m)

h : Lamme d'eau déversante (m)

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats obtenus. La colonne « Paramètres limitants » présente les éléments influant sur la sensibilité de chaque dispositif aux variations de hauteur d'eau amont.

Tableau 9 : Récapitulatif des sensibilités de chaque passe à la variation de hauteur d'eau amont

Dispositifs de franchissement	Paramètres limitants	Sensibilité aux variations de hauteur d'eau amont	Groupe (variable linguistique)
Rivières	Banquette et dévers	≤ 0,4m	2 (Moyen)
Pré-barrages	Échancrures fines et profondes	≤ 0,6m	3 (Élevé)
Passes en enrochements régulièrement répartis	Dévers permettent de diminuer la sensibilité	≤ 0,4m	2 (Moyen)
Passes en enrochements jointifs	Échancrures larges et superficielles	≤ 0,2m	1 (Faible)
PAB à « jet de surface »	Échancrures fines et profondes	≤ 0,6m	3 (Élevé)
PAB à « jet plongeant »	Échancrures larges et superficielles	≤ 0,2m	1 (Faible)

Le groupe 1 est constitué des passes très sensibles aux variations de hauteur d'eau amont.

Les passes à bassins à « jet plongeant » sont construites avec une section d'entrée hydraulique large et superficielle (déversoir). Une augmentation du niveau d'eau amont induit donc un accroissement rapide du débit, de la turbulence et de l'aération. Les passes en enrochements jointifs peuvent être construites avec des dévers, mais ne disposent pas de singularité permettant de ralentir l'écoulement. De plus, l'ouverture de la passe est large et peu profonde. Une augmentation du niveau d'eau amont engendre donc également une augmentation rapide du débit, de la turbulence et de l'aération.

Le groupe 2 est constitué des passes relativement peu sensibles aux variations de hauteurs amont.

Les rivières ou bras de contournements peuvent être construits avec des banquettes et/ou des dévers. Elles peuvent donc conserver leur fonctionnement hydraulique pour une gamme de hauteur d'eau conséquente. Les passes en enrochement régulièrement répartis peuvent également être dimensionnées avec un dévers et disposent en plus de blocs générant des déperditions d'énergie permettant de ralentir l'écoulement.

Le groupe 3 est constitué des passes très peu sensibles aux variations de hauteur d'eau amont.

Les passes disposant d'une section d'entrée hydraulique fine et profonde comme les passes en enrochement à rangées périodiques (pré-barrages) ou les passes à bassins à « jet de surface » supportent généralement bien les variations de hauteur d'eau amont. L'accroissement entre le débit et le volume d'eau dans les bassins évolue linéairement (turbulence et aération restent constantes).

V. 4. 3. Acquisition de la donnée

Le calcul de ce critère nécessite des données hydrologiques et des données topographiques. Les données hydrologiques correspondent aux débits caractéristiques du cours d'eau et sont obtenues grâce à la plateforme Banque Hydro. Les données topographiques sont déterminées à l'aide de Géoportail ou des documents informatifs joints à l'offre.

Nota : La méthode est détaillée plus précisément dans la « Fiche protocole FisPRO » en [annexe 11](#).

V. 4. 4. Traduction du critère sur FisPRO

Le tableau 9, présenté ci-dessus, établit pour chaque ouvrage de franchissement la variation de hauteur d'eau amont admissible. L'objectif est à présent de traduire les valeurs numériques obtenues en variables linguistiques afin de les introduire sur FisPRO. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer la « structure de la logique » du critère, le domaine de définition de chaque groupe et l'allure des fonctions.

Concernant la « structure de la logique », il a été considéré que :

- Si un dispositif peut supporter une variation de hauteur d'eau amont de 60 cm sans perdre sa fonctionnalité, il le reste également pour une variation de 20 et 40 cm ;

- Si un dispositif peut supporter une variation de hauteur d'eau amont de 40 cm sans perdre sa fonctionnalité, il le reste également pour une variation de 20 cm.

Le domaine de définition de la fonction du groupe 1 (Faible) est [0 ; 20], du groupe 2 est [0 ; 40] et du groupe 3 (Fort) est [0 ; 60cm]. L'allure des fonctions a été choisie dans l'optique de minimiser les dérivés afin de favoriser un accroissement lent du critère. C'est pourquoi, ce sont des fonctions triangulaires qui ont été sélectionné au lieu de fonctions trapézoïdales, gaussiennes ou sinusoidales. Le pic de chaque sous-ensemble flou a été calé grâce aux différents cas testés sur le modèle mais est globalement placé sur la moitié du domaine de définition de chaque groupe. A noter que ce critère ne dispose d'aucun intervalle net.

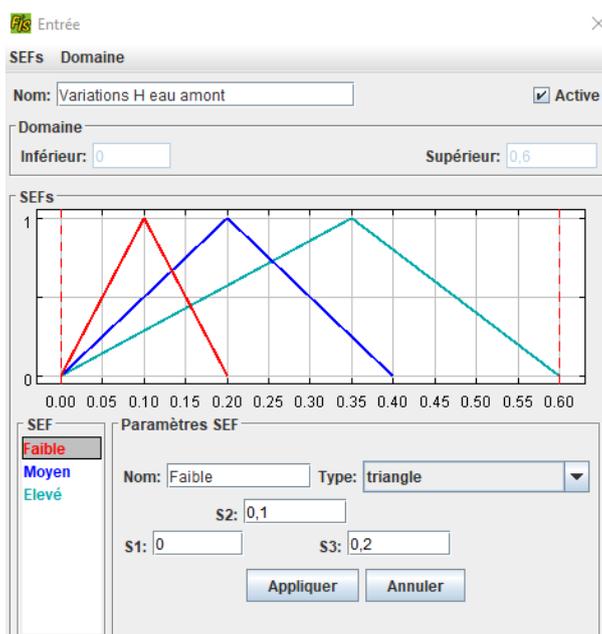


Figure 47 : Représentation du critère n°4 sur FisPRO

V. 4. 5. Analyse critique et incertitude du critère

Il est important de noter qu'il est extrêmement complexe de quantifier de façon précise les variations de hauteur d'eau en amont d'un ouvrage à cause de l'impact de la morphologie du cours d'eau (lit mineur et lit majeur) et de la forme du seuil (coefficient de seuil) sur les résultats. De plus, il est difficile d'estimer les incertitudes entre les variations réelles et calculées puisqu'il serait nécessaire :

- D'effectuer des levées topographiques du site et de niveau d'eau pour différents débits ;
- De modéliser et caler le système grâce à un logiciel de modélisation (HEC-RAS ou MIKE ZERO) qui utilise des formules plus précises que des lois de seuils et qui prend en compte la topographie du lit mineur et du lit majeur ;
- De modéliser les débits caractéristiques du cours d'eau (QMNA5 jusqu'au 3 fois le module) ;
- D'établir la différence entre les variations calculées grâce : à la loi de seuil, à la modélisation 1D et aux mesures terrains disponibles.

Cette méthode est laborieuse, chronophage donc onéreuse et difficile à mettre en œuvre. Ainsi, conscient que le critère est fragile et peu robuste, il permettra uniquement d'établir un ordre de grandeur et un comparatif entre les différentes passes.

De plus, l'interface de FisPRO permet de faire varier simplement le curseur des critères afin de déterminer l'incidence de la variation sur les passes proposées. Ce critère sera donc considéré comme « pouvant varier ».

V. 5. Critères rejetés

Pour construire le modèle, nous avons essayé de reproduire la logique qu'un expert dans le domaine peut avoir lorsqu'il est confronté à des problématiques de restauration de la continuité écologique. Durant la sélection des critères permettant de caractériser les différents sites d'études, une vérité semblait ainsi se dégager. Les critères peuvent généralement être classés selon leur nature : soit qualitative, soit quantitative. Dans ce type de questionnement, il est cependant difficile de créer des critères qualitatifs car ils sont propres à chaque décideur. Il est donc impossible de leur associer une valeur afin de les classer. De plus, la logique floue prend en compte les incertitudes de chaque critère et transforme des valeurs en variables linguistiques.

De ce fait, étant donné que la méthode proposée est basée sur ce type de logique et qu'elle ne prend pas en compte le contexte, il est difficile de caractériser parfaitement un site d'étude. Les critères rejetés sont :

- L'aspect multi-usages : ce critère caractérise la diversité des usages pouvant être associés à un ouvrage seuil. L'obstacle peut ainsi :
 - Être associé à une centrale hydroélectrique ;
 - Permettre le maintien du niveau d'eau dans un plan d'eau et donc améliorer l'attractivité de la commune et développer la pêche ;
 - Empêcher les canoës/kayaks de circuler librement, etc...

Ainsi en fonction des usages associés au site, l'implantation de certaines passes est plus pertinente que d'autres. Par exemple, si la pratique du canoë est développée dans le secteur il est judicieux d'installer une passe qui peut permettre leur dévalaison.

- Intégration paysagère : ce critère est implicitement introduit dans FisPRO au niveau des règles. Lorsque 2 passes peuvent être implantées sur le site, la passe la plus « naturelle » est choisie ;
- Embâcles : certains dispositifs de franchissement sont plus sensibles aux embâcles que d'autres. De plus, la quantité d'embâcles au niveau d'un ouvrage dépend de son emplacement géographique et de la ripisylve du cours d'eau. Ainsi, s'il était possible de quantifier la quantité d'embâcles potentiels sur chaque site il serait possible d'affiner le choix de la passe ;
- L'attractivité de la passe : l'attractivité d'une passe est essentielle à la détection du dispositif par l'ichtyofaune. Cependant, il semble difficile de déterminer une méthode généralisée permettant de quantifier l'attractivité car cela dépend de la forme du site et du débit dans la future passe ;
- La variation de hauteur d'eau aval : ce paramètre est important dans le choix des passes car certaines d'entre elles supportent mal les variations de hauteur d'eau à l'aval du seuil. Néanmoins, sans informations sur le fonctionnement hydraulique aval du cours d'eau (possibilité d'influence d'un ouvrage situé à l'aval, particularités hydromorphologiques, etc...) et sans données topographique, la construction de ce critère semblait impossible ;
- Coût : ce critère n'est pas intégré au logiciel FisPRO, mais un outil d'estimation du coût a été développé en complément et est présenté dans la suite de l'étude.

VI. OUTIL FISPRO

Le modèle FisPRO est construit à partir de plusieurs variables d'entrées, d'une variable de sortie et de règles floues permettant de « construire, cadrer et orienter » les résultats du modèle.

VI. 1. Variables d'entrées et variable de sortie

Les variables d'entrées correspondent aux 4 critères détaillés précédemment :

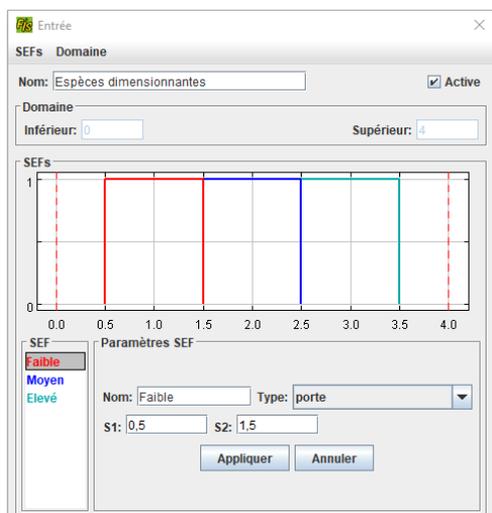


Figure 48 : Représentation du critère n°1 sur FisPRO

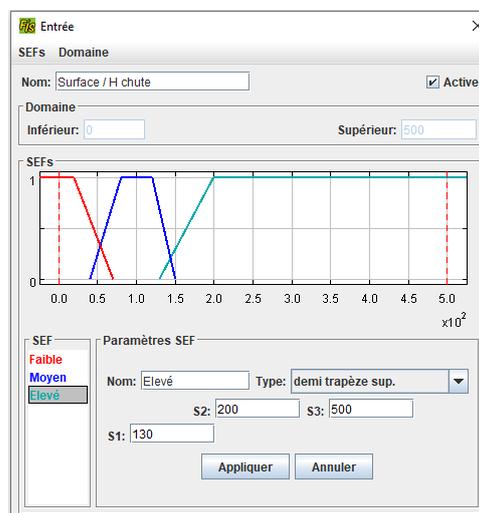


Figure 49 : Représentation du critère n°2 sur FisPRO

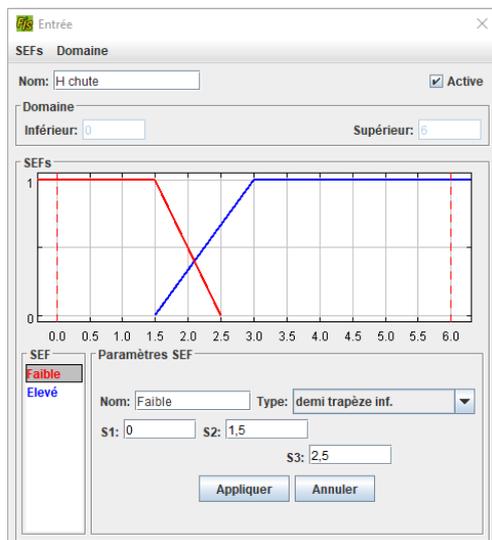


Figure 50 : Représentation du critère n°3 sur FisPRO

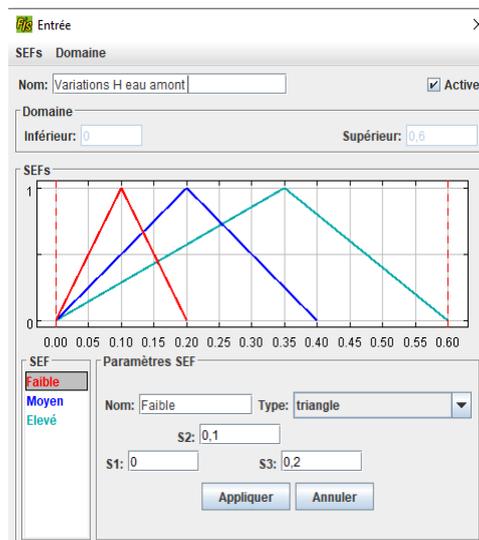


Figure 51 : Représentation du critère n°4 sur FisPRO

La variable de sortie est constituée des différents dispositifs de franchissement. La figure ci-dessous présente le choix de représentation de la variable. Chaque triangle isocèle correspond à un type de passe. L'intervalle occupé par chaque dispositif n'a pas d'importance, il doit juste être similaire pour chaque sous-ensemble flou (SEF). L'allure de la fonction a été choisie afin d'avoir une meilleure lecture des résultats. Les triangles auraient pu être remplacés par des trapèzes.

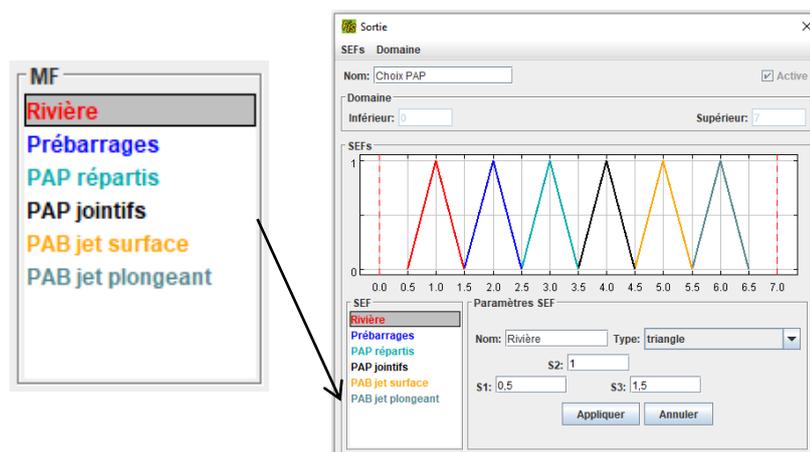


Figure 52 : Représentation de la variable de sortie "Choix PAP » sur FisPRO

VI. 2. Règles floues

Le moteur d'inférence est constitué de l'ensemble des règles floues (Annexe 5) qui structurent et caractérisent le modèle. Le maillage complexe de règles permet ensuite d'obtenir des résultats cohérents. Le nombre de règles floues total correspond à toutes les combinaisons possibles entre les variables de chaque critère comme pour un arbre de probabilité. On dénombre dans notre cas :

Équation 1 : Equation permettant de calculer le nombre de règle sur FisPRO

$$Nb. de règles : \prod_{i=1}^4 (\text{Nombre de variables linguistiques par critère}) = 3 \times 3 \times 2 \times 3 = 54 \text{ règles}$$

Cette conclusion est une des limites de cet outil puisque le calage des règles floues est chronophage et que le nombre de règles augmente très rapidement si des variables ou des critères sont ajoutés (ex : 5 critères et 3 variables par critère : $3^5 = 243$ règles).

Ainsi, d'autres critères auraient pu être sélectionnés mais au vu de l'augmentation quasi-exponentielle du nombre de règles il était indispensable de trouver un compromis entre la précision du modèle et le temps de calage des règles floues. Une analyse critique de la méthode est proposée dans la partie VI.4.2. « Analyse critique de la méthode et des résultats obtenus ».

VI. 2. 1. Construction du modèle basé sur les règles floues

Les critères sélectionnés ont pour objectif de caractériser de façon globale des sites d'études complexes et totalement différents les uns des autres. Dans une démarche d'aide à la décision, ils doivent également permettre de comparer et de discriminer des différents ouvrages de franchissement afin de pouvoir les conserver s'ils sont adaptés, les exclure en cas d'incompatibilité ou les trier s'il reste plus d'un dispositif conservé. Le tableau ci-dessous présente pour chaque critère la variable linguistique associée à chaque dispositif.

La dernière colonne du tableau correspond à une note attribuée à chaque ouvrage en fonction de ses caractéristiques pour chaque critère. Les passes ayant des résultats proches de la note maximum auront une probabilité plus élevée d'être retenues car elles sont globalement meilleures selon ces quatre critères. De plus, cette échelle de notation permet de quantifier la disparité entre les ouvrages. Un des objectifs lors de la sélection des critères a été de minimiser la dispersion des notes afin d'avoir des dispositifs qui selon les critères choisis sont équiprobables.

Tableau 10 : Récapitulatif des variables linguistiques par critère pour chaque dispositif de franchissement

Dispositifs de franchissement	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Note
	Espèces piscicoles	Surface / H chute	Hauteur de chute	Variations hauteur d'eau amont	Vert =3 Jaune = 2 Rouge =1
Rivières	Élevé	Élevé	Élevé	Moyen	9/12
Pré-barrages	Élevé	Moyen	Faible	Élevé	9/12
Passes en enrochements régulièrement répartis	Élevé	Moyen	Faible	Moyen	8/12
Passes en enrochements jointifs	Moyen	Moyen	Faible	Faible	6/12
PAB à « jet de surface »	Élevé	Faible	Élevé	Élevé	12/12
PAB à « jet plongeant »	Faible	Faible	Faible	Faible	6/12

Le moteur d'inférence a la même structure qu'un arbre de probabilité, sauf que l'arbre de probabilité associe une probabilité d'occurrence à chaque branche alors que le moteur d'inférence y associe une variable linguistique, elle-même caractérisée par une fonction mathématique. Dans le cas du moteur d'inférence, la probabilité associée à la branche n'est donc pas fixe puisqu'elle dépend des caractéristiques de la fonction de la variable (allure et intervalle) et de la valeur associée à chaque critère en fonction du site étudié (figure 54). Le modèle est donc plus dynamique et plus réactif aux variations des critères.

Règles

Règles Affichage

Règle	Active	SI Espèces dimensionnantes	ET Surface / H chute	ET H chute	ET Variations H eau amont	ALORS Choix PAP
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Faible	Faible	PAB jet plongeant
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Faible	Moyen	Prébarrages
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Faible	Elevé	Prébarrages
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Elevé	Faible	PAB jet surface
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Elevé	Moyen	PAB jet surface

Figure 53 : Présentation des cinq premières règles composant le moteur d'inférence

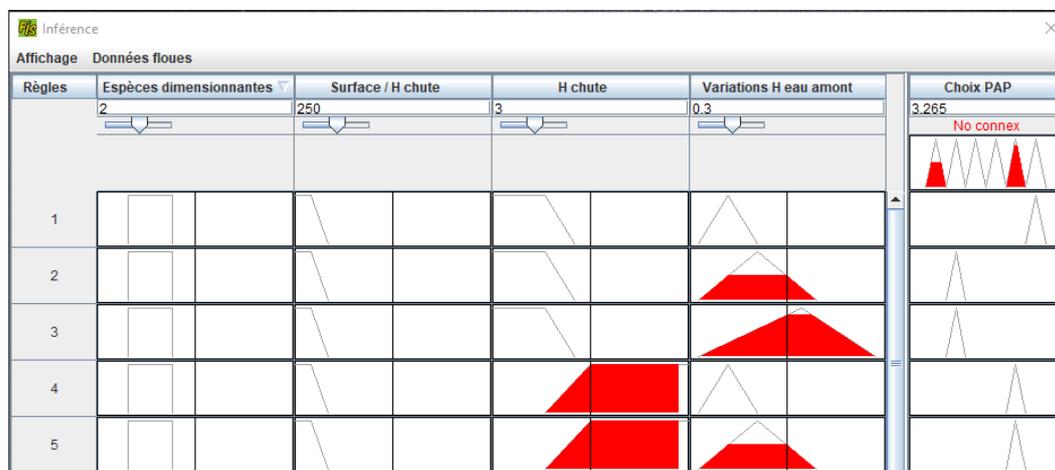


Figure 54 : Présentation des cinq premières règles inférées

Les règles floues sont reliées par l'opérateur « ET » qui a pour propriété de synthétiser la notion d'intersection par le minimum des degrés d'appartenance aux classes considérées. C'est-à-dire qu'un résultat est obtenu uniquement si toutes les variables d'une même règle sont activées. Le résultat affiché correspond ensuite à la valeur minimale obtenue parmi les critères (figure 55).

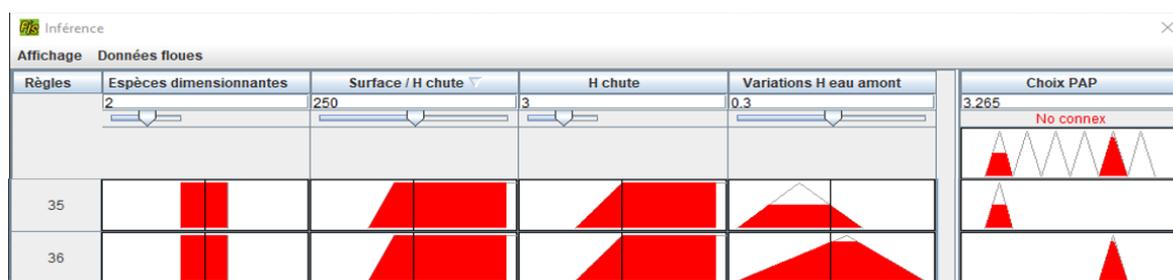


Figure 55 : Présentation des règles floues 35 et 36

L'opérateur « OU » synthétise la notion de réunion par le maximum. Dans notre cas d'étude cet opérateur n'est pas adapté puisqu'il est nécessaire d'avoir les 4 critères activés en simultanément pour pouvoir implanter un type d'ouvrage de franchissement. Si par exemple les critères 1, 3 et 4 sont activés pour une rivière de contournement mais que la place disponible est insuffisante, il serait, dans les faits, impossible de l'implanter. De plus, l'outil doit permettre d'aider l'utilisateur dans sa prise de décision. Pour ce faire il doit dans certains cas comparer plusieurs passes sélectionnées afin de les trier. L'opérateur « OU » sélectionne les maximums, il aura donc tendance à majorer les résultats ce qui rend la comparaison plus difficile. Par exemple, sur la figure 55, si l'opérateur « OU » avait été utilisé, le résultat des 2 passes sélectionnées aurait été arrondi au maximum (100%) alors que dans ce cas on peut observer que la 1^{ère} passe est moins adaptée que la 5^e car elle est plus sensible aux variations de hauteur d'eau amont.

VI. 2. 2. Logique de création des règles floues

Le sous-ensemble flou de la variable de sortie sélectionné pour chaque règle a été choisi en fonction d'une certaine logique. Ne pouvant pas détailler la construction des 54 règles floues par manque de place et de pertinence, seule la logique globale sera explicitée. Toutes les règles floues sont présentées en [annexe 5](#).

Concernant les critères :

- Critère n°1 : Le groupe 3 englobe le groupe 2 qui englobe le groupe 1. C'est-à-dire que si des espèces du groupe 3 peuvent franchir l'ouvrage, des espèces du groupe 2 et 1 le peuvent aussi. La réciproque est fautive. La logique est la même pour la groupe 2. Si les espèces du groupe 2 peuvent franchir l'ouvrage, celle du groupe 1 le peuvent aussi mais pas celle du groupe 1 ;
- Critère n°2 : Même logique qu'avec le critère n°1. Si la surface disponible est suffisante pour des passes nécessitant une grande surface d'implantation, elle le sera également pour celle qui en nécessite moins. La réciproque est fautive ;
- Critère n°3 : « Élevé » englobe « Faible ». Les passes pouvant être implantées sur des sites ayant des hauteurs de chute « Élevé » peuvent également l'être sur des hauteurs de chute « Faible ». La réciproque est fautive ;
- Critère n°4 : Même logique qu'avec le critère n°1 et 2. Si une passe supporte des variations de hauteur d'eau importantes alors elle supportera également des variations moins conséquentes. La réciproque est fautive.

Autres :

- Lorsque la hauteur de chute est faible mais que les variations de hauteur d'eau amont sont élevées, il faut alors privilégier les pré-barrages aux passes à bassins ;
- Si plusieurs ouvrages peuvent être sélectionnés pour une même règle alors l'intégration paysagère de la passe est prise en compte en faisant prévaloir les rivières de contournement puis les passes « naturelles » (enrochement et pré-barrages) et enfin seulement les passes à bassin en béton armé ;
- Il est difficile d'intégrer des critères qualitatifs dans les variables d'entrées de la logique floue étant donné qu'on ne peut pas les quantifier, y associer une valeur et donc les classer. C'est pourquoi, ces paramètres ont été ajoutés aux règles et permettent ainsi d'orienter les résultats. De plus, les critères quantitatifs tels que l'intégration paysagère sont subjectifs et ont donc une importance secondaire puisque c'est la fonctionnalité du dispositif qui prévaut.

- Si plusieurs dispositifs peuvent être sélectionnés pour une même règle et que l'intégration paysagère n'est pas non plus discriminante alors il faut choisir l'ouvrage avec le moins d'écart. Cela permet de créer de la diversité au sein des résultats des passes proposées tout en restant cohérent.

Afin d'illustrer nos propos, 2 exemples de construction de règles sont présentés ci-dessous :

Tableau 11 : Présentation de deux cas concrets de règles du moteur d'inférence

Critères	Exemple n°1 : règle floue 26	Exemple n°2 : règle floue 49
Espèces piscicoles dimensionnantes	Moyen	Élevé
Surface disponible sur hauteur de chute	Moyen	Élevé
Hauteur de chute	Faible	Faible
Variation de hauteur d'eau amont	Moyen	Faible

- Exemple n°1 : règle floue 26

Si « Espèces dimensionnantes » est MOYEN **et** « Surface/H chute » est MOYEN **et** H chute est FAIBLE **et** « Variations H eau amont » est MOYEN **alors** « PAP en enrochements régulièrement répartis »

Tableau 12 : Détail du choix du dispositif pour la règle n°26

Dispositifs de franchissement	Sélection 1 : critères	Sélection 2 : critères et intégration paysagère	Sélection 3 : moins d'écart
Rivières	Rejeter (surface insuffisante)	-	-
Pré-barrages	Sélectionner	Sélectionner	Supprimer (critère 4 élevé alors que moyen est suffisant)
Passes en enrochements régulièrement répartis	Sélectionner	Sélectionner	Sélectionner (critère 4 moyen)
Passes en enrochements jointifs	Rejeter (trop sensible aux variations de hauteur d'eau)	-	-
PAB à « jet de surface »	Sélectionné	Rejeter (intégration paysagère)	-
PAB à « jet plongeant »	Supprimer (trop sélectif concernant les espèces)	-	-

- Exemple n°2 : règle floue 49

Tableau 13 : Détail du choix du dispositif pour la règle n°49

Dispositifs de franchissement	Sélection 1 : critères	Sélection 2 : critères et intégration paysagère
Rivières	Sélectionner	Sélectionner
Pré-barrages	Sélectionner	Rejeter (intégration paysagère)
Passes en enrochements régulièrement répartis	Sélectionner	Rejeter (intégration paysagère)
Passes en enrochements jointifs	Supprimer (trop sélectif concernant les espèces)	-
PAB à « jet de surface »	Sélectionner	Rejeter (intégration paysagère)
PAB à « jet plongeant »	Supprimer (trop sélectif concernant les espèces)	-

VI. 2. 3. Interface de sortie

L'interface de sortie du logiciel FisPRO permet généralement d'attribuer une valeur nette à la variable de sortie grâce à la méthode des MM ou des COG (Exemple en partie III.). Dans le cadre de notre étude, l'interprétation de l'interface de sortie est différente car l'intérêt ne se porte pas sur la valeur nette obtenue (2,952 dans le tableau ci-dessous) mais sur les triangles et le pourcentage de « remplissage ».

Lorsque toutes les variables linguistiques d'une règle sont activées, le dispositif associé à la règle est également activé et le triangle qui le représente se remplit de façon équivalente toute en respectant la notion d'intersection par le minimum. De plus, lorsque plusieurs règles associées à un même dispositif sont activées les pourcentages de « remplissages » se cumulent. La figure ci-dessous illustre le fonctionnement de l'interface :

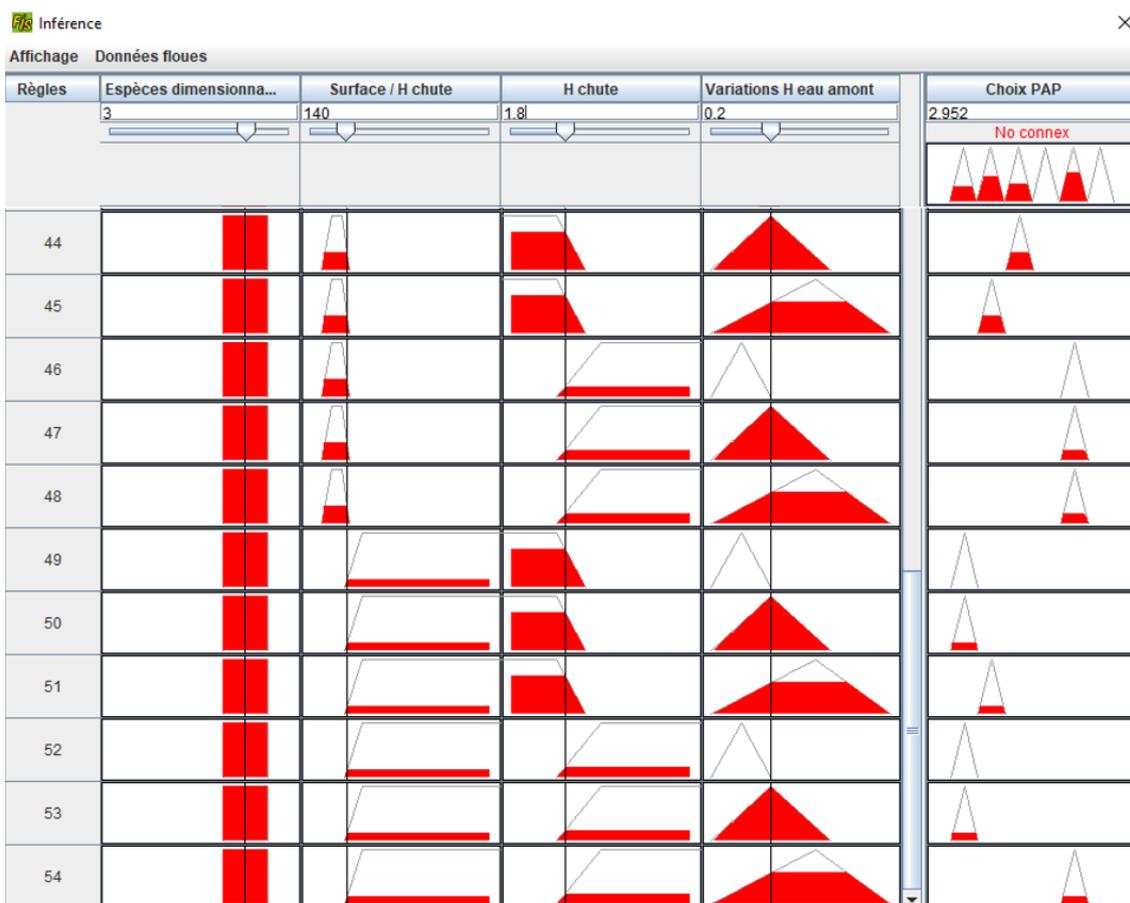


Figure 56 : Exemple de résultat de l'inférence

VI. 3. Méthode de calage et de vérification

« Un modèle scientifique est une représentation simplifiée d'un phénomène. Il permet d'élaborer une théorie plus ou moins précise adhérent aux observations et de prévoir ce qu'il se passerait dans certaines conditions. Dans la plupart des cas, un modèle reste limité à un domaine d'application en dehors duquel ledit modèle n'est plus applicable. »

[Définition d'un modèle scientifique - Larousse].

Le modèle conçu sur FisPRO permet de simuler le mécanisme de sélection d'un ouvrage de franchissement sur un site particulier. Afin de le valider et de garantir sa fonctionnalité, il est impératif de vérifier que celui-ci soit pertinent, qu'il couvre bien le champ du problème réel et qu'il permet d'obtenir les résultats escomptés dans le délai souhaité.

Pour vérifier la qualité des résultats exprimée par le modèle, 2 méthodes ont été utilisées :

- Modélisation de 42 sites d'étude concrets sur FisPRO afin de comparer le dispositif implanté en réalité et les résultats produits par FisPRO.
- 20 sites d'étude parmi les 42 ont été proposés à 2 ingénieurs en hydraulique fluviale experts dans les thématiques liées à la restauration de la continuité écologique. L'objectif est de quantifier la concordance entre les dispositifs implantés dans les cas concrets et leurs propositions.

VI. 3. 1. Première méthode de vérification : 42 cas concrets modélisés sur FisPRO

La première méthode permettant de vérifier la robustesse du modèle se base sur le test de cas d'études concrets et fonctionnels sur le modèle FisPRO. 42 études ont ainsi été sélectionnées pour les 6 différents types d'ouvrage de franchissement. Les dispositifs sont issus du rapport GHAAPPE ou d'études menées par Artelia, Eurovia, NCA, VNF et validées par les agences de l'eau. Les passes choisies ont des caractéristiques hydraulique (largeur et débit du cours d'eau) ou topographique (hauteur de chute et inclinaison seuil) diversifiées afin de tester le modèle dans son intégralité et de déterminer ses limites. Le tableau récapitulatif présenté en [annexe 6](#) détaille la base de données utilisée.

Pour tester un site, les valeurs associées aux différents critères sont déterminées puis introduites sur FisPRO (critères 1, 2 et 3). Le critère n°4, correspond à la variation de hauteur d'eau amont. N'étant que très rarement précisé dans les études, ce critère est mis au maximum puis diminué petit à petit. Si le dispositif implanté dans la réalité est en concordance avec la proposition de FisPRO, le cas est validé.

Sur les 42 cas d'études testés, il y a une concordance des résultats pour 38 d'entre eux ([Annexe 7](#)). Parmi les 4 cas non fonctionnels il y a 1 cas particulier qui ne peut, dans l'état actuel du modèle, pas être compris par celui-ci. Les 3 autres cas ne respectent pas les préconisations des abaques de dimensionnements et n'appartiennent pas non plus aux domaines d'application du modèle. Le tableau ci-dessous présente les 4 cas non fonctionnels :

Tableau 14 : Limite de la méthode

N°	Dispositifs de franchissement	Source	Surface /	Chute	Remarques
			H chute	m	
			m ² /m	m	
13	Enrochement jointifs	Rapport GHAAPPE p.28 - Iller (Allemagne)	97	2,83	Hauteur de chute trop importante pour les PAP jointifs. Avec une pente règlementaire de 5%, la longueur de la passe est de 56m. Vitesses trop importantes, pas de zones de repos, pas assez d'endurance.
17	Enrochement jointifs	ARTELIA - Goersdorf	14	0,35	Erreur , le modèle n'est pas très adapté aux petites échelles (petit cours d'eau, petite chute). Il serait nécessaire de créer un SEF supplémentaire pour les hauteurs de chute faible ou un critère supplémentaire. Mais cela augmenterait le nombre de règles.
26	Enrochement régulièrement répartis	ARTELIA - Goersdorf	238	0,8	Ouvrage surdimensionné. Largeur importante et pente fixée à 2% alors que les pré-barrages peuvent être dimensionnés pour des pentes de 5%. Le critère 2 "Surface/H chute" est alors très conséquent (SEF élevé) ce qui favorise davantage les rivières aux pré-barrages.
42	Bassins à échancrures profondes	NCA - Moulin de la Roche à Gué	47	1,41	Pour des chutes inférieures à 1,5 m le modèle privilégie les passes "naturelles". Des enjeux supplémentaires ont sûrement été pris en compte durant d'étude privilégiant les passes à bassins.

VI. 3. 2. Seconde méthode de vérification : 20 cas concrets analysés par des experts en RCE

Parmi les 42 cas préalablement testés sur FisPRO, 20 cas ont été sélectionnés pour une seconde méthode de vérification. Les 20 sites et certaines de leurs caractéristiques (Espèces piscicoles, débits et largeur du cours d'eau, hauteur de chute et localisation du site sur Géoportail) ont été transmis à 2 ingénieurs en

hydraulique fluviale, spécialisés dans la thématique de la restauration de la continuité écologique et le dimensionnement de dispositifs de franchissement piscicole. Trois propositions de dispositif pouvaient au maximum être effectuées par chaque expert. Il n'y avait, dans le protocole, pas l'obligation de faire trois propositions.

En général une étude comporte 2 à 3 scénarios. Nous faisons l'hypothèse que la 1^{ère} proposition correspond à l'effacement et que les 2 autres soient axées sur l'implantation d'un ouvrage de franchissement piscicoles couplé ou non à un arasement de seuil afin de diminuer la hauteur de chute à franchir.

VI. 3. 2. 1. Comparaison entre les propositions validées par les agences de l'eau et celles effectuées par des experts en RCE pour les différents cas concrets

La première analyse des résultats compare les propositions validées par les agences de l'eau (ouvrages implantés) et les propositions effectuées par les experts pour les différents cas d'études. L'objectif est d'identifier une similitude entre les propositions des 2 parties malgré le manque de données transmises aux experts. Le tableau présenté ci-dessous récapitule les résultats obtenus pour les 2 ingénieurs hydrauliciens. Le tableau présenté en annexe 8 détaille les propositions de chaque expert pour les différents cas d'étude.

Tableau 15 : Tableau récapitulatif de la comparaison des propositions : cas concret et experts

Ingénieur hydraulicien	Nombre de cas étudiés	Propositions similaires entre le cas concret et l'expertise pour la proposition :			Propositions différentes entre le cas concret et l'expertise	Cas trop complexe ou manquant de données pour une expertise	Cas d'étude pour lesquelles l'expert a proposé 3 propositions
		Numéro 1	Numéro 2	Numéro 3			
E. Noisette	20	4	4	5	3	4	11/16
G. Pasquier	20	8	4	0	4	4	2/16

En analysant les résultats obtenus par les deux experts, différentes observations émergent :

- Pour Mme. Elisabeth Noisette :
 - 50% des propositions (1 et 2) effectuées par l'expert sont en concordance avec les cas concrets malgré un manque certain d'information ;
 - Si les trois propositions sont conservées alors 81% des propositions (1,2 et 3) sont en accord avec les cas concrets ;
 - Parmi les seize cas conservés, seul trois cas ont des propositions totalement différentes, soit 19%.
- Pour M. Germain Pasquier :
 - 75% des propositions (1 et 2) effectuées par l'expert sont en concordance avec les cas concrets malgré un manque certain d'information ;
 - Parmi les seize cas conservés, quatre cas ont des propositions totalement différentes soit 25%.

Ces observations permettent de déduire qu'il semble difficile, en raison de la complexité de la tâche et du manque d'information, de déterminer le type de passes à implanter de façon systématique. L'absence de contexte et le manque de connaissances du site peuvent en parité justifier ces différences car l'expert doit uniquement basé sur raisonnement sur ses connaissances réglementaires et son expérience. Il est également possible que les données fournies aux experts ne soient pas suffisantes ou parfaitement adaptées.

VI. 3. 2. 2. Comparaison entre les propositions produites par FisPRO et celles soumises par des experts en RCE pour les différents cas concrets

La seconde analyse des résultats compare les propositions produites par FisPRO pour les différents cas validés par les agences de l'eau (ouvrages implantés) et les propositions effectuées par les experts. L'objectif est d'identifier une similitude, entre les propositions des deux parties, malgré le manque de données transmises aux experts. Le tableau présenté ci-dessous récapitule les résultats obtenus pour les deux ingénieurs hydrauliciens. Le tableau présenté en annexe 9 détaille les propositions de chaque expert pour les différents cas d'étude.

Tableau 16 : Tableau récapitulatif de la comparaison des propositions : FisPRO et experts

Ingénieur hydraulicien	Nombre de cas étudiés	Propositions similaires entre FisPRO et l'expertise pour la proposition :			Propositions différentes entre le cas concret et l'expertise	Cas trop complexe ou manquant de données pour une expertise	Cas d'étude pour lesquelles l'expert a proposé 3 propositions
		Numéro 1	Numéro 2	Numéro 3			
E. Noisette	20	7	8	1	0	4	11/16
G. Pasquier	20	12	2	0	2	4	2/16

En analysant les résultats obtenus par les deux experts, différentes observations émergent :

- Pour Mme. Elisabeth Noisette :
 - 94% des propositions (1 et 2) effectuées par l'expert sont en concordance avec les résultats du modèle FisPRO ;
 - Si les trois propositions sont conservées alors 100% des propositions (1,2 et 3) sont en accord avec les résultats du modèle FisPRO ;
 - Parmi les seize cas conservés, aucun cas n'a de propositions différentes.
- Pour M. Germain Pasquier :
 - 88% des propositions (1 et 2) effectuées par l'expert sont en concordance avec les résultats du modèle FisPRO dont 75% pour la première proposition ;
 - Parmi les seize cas conservés, deux cas ont des propositions totalement différentes, soit 12%.

Ces observations mettent en évidence une amélioration générale des résultats. Cela est en partie dû au fait que le logiciel FisPRO propose entre 1 et 3 propositions par cas, la probabilité d'avoir des réponses similaires est donc plus grande puisqu'il y a davantage de combinaisons « gagnantes ».

Pour la 1^{ère} analyse, la probabilité aléatoire d'avoir une concordance pour un seul cas est au maximum de 1/3 (concordance pour les 16 cas est de $1/4,3 \times 10^7 = 2,3 \times 10^{-8}$) alors que dans la 2^{ème} analyse, la probabilité d'avoir une concordance pour un cas est au maximum de 1/2 (concordance avec les 16 cas est de $1/6,6 \times 10^5 = 1,5 \times 10^{-5}$).

Pour M. Germain Pasquier la concordance avec le logiciel FisPRO pour la 1^{ère} proposition est de 75%. Les données transmises à FisPRO et à l'utilisateur du test sont quasi-similaires. Il semblerait donc que tous deux appliquent la même logique, car les résultats sont plus élevés que dans la 1^{ère} analyse. FisPRO et les experts se basent uniquement sur leurs connaissances réglementaires et bibliographiques pour effectuer un diagnostic puisqu'ils n'ont pas accès à davantage de données. Les bureaux d'études disposent quant à eux d'un contexte, des enjeux et de contraintes particulières qui ne sont pas prises en compte par FisPRO ou l'expert à ce stade de l'étude.

VI. 4. Analyse Critique et incertitudes de l'outil

VI. 4. 1. Analyse statistique de la méthode

Les critères comportent tous des incertitudes. Il est possible de quantifier la variabilité des paramètres utiles à la construction des critères et d'estimer de façon approximative les incertitudes associées à chacun d'entre eux mais il est difficile, voire impossible de déterminer l'impact des incertitudes de chaque critère sur le résultat proposé par FisPRO. Cela pour plusieurs raisons :

- La méthode et le logiciel FisPRO sont basés sur la logique floue, les critères sont donc caractérisés par l'existence de marges d'erreurs correspondant aux espaces flous. Les espaces flous sont les intervalles pour lesquelles les variables ne valent pas 0 ou 1 mais prennent en compte un degré de vraisemblance compris entre 0 et 1 ;
- Il y a énormément de combinaisons de valeurs possible et le résultat dépend de la valeur du critère et de la valeur des autres critères. Par exemple pour le critère n°2 (surface/Hauteur de chute) : dans certains cas, des variations de l'ordre du dixième peuvent avoir un impact sur le résultat produit par FisPRO alors que pour d'autres, des variations de l'ordre de la dizaine n'en ont aucun.

Par exemple si la surface du bassin versant est surévaluée de 10%, cela aura un impact sur les débits du cours d'eau, puis sur les variations de hauteur d'eau amont et pour finir sur le résultat. Mais cela dépendra également de la morphologie du cours d'eau, de la précision de la mesure de la longueur du seuil, etc.. et aussi de l'allure et du domaine de définition des fonctions de chaque sous-ensemble flou, des incertitudes des autres critères, etc...

Néanmoins, afin d'estimer la robustesse du modèle, plusieurs études ont été réalisées sur les résultats et sont développées dans la partie VI.3. Grâce à ces études, il est possible de déterminer les incertitudes globales mais pas de les quantifier précisément pour chaque critère. Les deux méthodes employées semblent encourageantes mais il serait pertinent d'étudier davantage de cas concrets afin d'identifier les limites et les singularités du modèle.

La 1^{ère} méthode compare les passes implantées dans le cadre d'études concrètes, et les résultats proposés par FisPRO. Parmi les 42 cas sélectionnés, 38 cas ont des propositions similaires et seul un des quatre cas différents n'est pas compris par le modèle. D'après cette méthode, le modèle FisPRO donne des résultats cohérents avec 90% de similitude en fourchette base et 97% en fourchette haute.

La seconde méthode compare les propositions émises par des experts dans le domaine et par le logiciel FisPRO pour les mêmes cas d'études. Parmi les 20 cas étudiés dans cette seconde méthode, les experts ont considéré que 4 cas étaient trop complexes ou manquaient d'informations, et ne pouvaient donc pas être étudiés de manière objective et pertinente. Parmi les 16 cas restants, les propositions d'Elisabeth Noisette et de FisPRO sont similaires à 94 % et celle de Germain Pasquier et de FisPRO à 88%.

La plage d'incertitudes du modèle FisPRO est donc, d'après ces deux méthodes de quantification, de **[88% ; 97%]**. Si davantage de cas de figure avait été étudiés, nous pouvons supposer que nous aurions constaté dans un premier temps une diminution du pourcentage de concordance entre les propositions. Mais qu'ensuite le pourcentage de concordance se serait stabilisé car il aurait été possible de recalibrer les règles et les sous-ensembles flous de chaque critère et de repenser ou de rajouter des critères ou des sous-ensembles flous.

Nota : Nous avons contacté Bruno Voetgle, Dominique Courret et Philippe Baran, auteurs d'un rapport pour l'OFB visant à estimer le coût de passes à poissons et disposant d'une base de données de 272 cas mais sans succès.

VI. 4. 2. Analyse critique de la méthode et des résultats obtenus

L'outil d'aide à la décision développé sur FisPRO semble fonctionnel. Il propose des dispositifs de franchissements adaptés aux sites d'études. Les deux méthodes de vérification estiment que la précision du modèle varie entre **88 et 97%**. Les résultats obtenus semblent donc encourageants.

Néanmoins, plusieurs points sont encore critiquables et peuvent être ajustés, améliorés ou optimisés. D'un point de vue global les quatre critères sélectionnés permettent d'obtenir des résultats satisfaisants. Cependant de nombreux paramètres n'ont pas pu être intégrés au modèle en raison d'une incompatibilité avec les systèmes d'inférence floue ou par manque de temps. Les critères qualitatifs (Exemple : Intégration paysagère) ont été rejetés car ils sont propres à chaque décideur. Il est donc difficile de leur associer une valeur afin de les classer, à moins que l'interface soit ajustable en fonction des attentes de chacun. Il serait alors nécessaire de créer plusieurs modèles FisPRO, de repenser la structure de celui-ci ou d'utiliser d'autres outils en complément. Concernant les critères, il semble difficile d'estimer les incertitudes associées à chacun d'entre eux et de déterminer l'impact des incertitudes sur le résultat final. De plus, la méthode a été appliquée sur trop peu de cas concrets. Nous n'avons donc pas encore le recul suffisant pour quantifier l'impact d'une mauvaise estimation d'un des critères sur le résultat.

La méthode ne comporte actuellement que quatre critères car l'accroissement du nombre de règles à caler dans le moteur d'inférence suit une fonction a^b avec « a » le nombre de sous-ensemble flou par critère et « b » le nombre de critères. Le calage et la vérification des règles étant particulièrement chronophage, nous étions limités. Le tableau présenté ci-dessous permet d'illustrer ce point (en gras le couple choisis).

Tableau 17 : Estimation du nombre de règle à caler

Nombre de critère	Nombre de sous-ensemble flou par critère					
	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	1	4	9	16	25	36
3	1	8	27	64	125	216
4	1	16	81	256	625	1296
5	1	32	243	1024	3125	7776

Le calage présente également un certain nombre de limites. D'une part de nature épistémique puisque la notion de paramètre est bornée par les limites conceptuelles de la modélisation qui conduit à ce que les paramètres ne soient pas entièrement définis (conceptuellement ou physiquement). D'une autre part de nature pratique puisque le calage a été effectué à partir d'un ensemble limité de données.

VII. OUTIL D'ESTIMATION DU COUT

L'analyse du coût des différents ouvrages de franchissement se base sur un rapport produit par le pôle éco-hydraulique d'ECOGEO en 2015 en partenariat avec l'IRSTEA, l'ONEMA et INP de Toulouse. Le rapport intitulé Mise au point d'outils d'estimation du coût des passes à poissons est rédigé par P. Baran, D Courret et B. Voetgle. Il propose une étude statistique à large échelle aboutissant à la création de formules permettant d'apprécier le coût hors taxes des travaux. Ce document a initialement été conçu pour informer les maîtres d'ouvrage du coût des travaux de restauration de la continuité écologique.

VII. 1. Définition et objectifs de l'outil

Dans l'optique de proposer au maître d'ouvrage un outil d'aide à la décision complet et pluridisciplinaire. Une analyse du coût d'étude, de travaux et d'entretien des différents ouvrages de franchissement en fonction du site a été menée. L'objectif de cette étude est de déterminer le coût de chaque phase du projet pour chaque dispositif en fonction du site d'étude afin de donner, au Maître d'ouvrage, une vision sur le long terme. Il est évident que chaque site est particulier, les résultats obtenus ne seront donc pas exacts. L'intérêt est davantage d'estimer des ordres de grandeur pour chaque passe afin de les classer. Si l'étude menée sur FisPRO aboutit et propose plusieurs passes fonctionnelles, l'outil d'estimation des coûts permettra d'ajouter une dimension supplémentaire à la prise de décision et ainsi d'affiner le choix.

VII. 2. Construction de l'outil d'estimation du coût

Le critère a été construit grâce à un rapport intitulé Mise au point d'outils d'estimation du coût des passes à poissons qui fait suite au rapport GHAAPPE de 2001.

Le rapport a été élaboré à partir de l'analyse de 272 passes à poissons existantes (239 sélectionnées et 114 utilisées) et a abouti à la création d'outils d'estimation de coûts basés sur des formules statistiques. Les ouvrages de franchissements sélectionnés sont très variés : 41% de passes sont des passes à bassins, 16% des passes en enrochement (« naturelles »), 15% des passes à anguilles, 7% des rivières de contournement et 4% des pré-barrages. Le choix des sites d'implantation et des paramètres de dimensionnement (hauteur de chute entre 1,6 et 2,9 m, module entre 2,2 et 49,4 m³/s, etc..) diffèrent également afin d'avoir un large panel d'ouvrage.

Le rapport propose ainsi plusieurs formules statistiques qui dépendent d'une combinaison de paramètre relativement simple à obtenir : hauteur de chute, module du cours d'eau, débit dans la passe, etc... Les formules obtenues sont issues d'une étude statistique qui prend en compte les incertitudes et donne des résultats sous forme d'intervalles. Certains facteurs comme la présence d'un débit d'attrait, d'un dispositif de comptage des poissons (coût x1,5), d'une installation hydroélectrique (coût x0,8) ou la zone géographique peut influencer le coût. Les résultats de l'étude précisent qu'il n'y a pas de différence significative entre le coût de travaux des passes en enrochements et les passes à bassins. Une analyse du coût d'entretiens pourra donc dans certains cas établir une différence.

Le coût d'un projet peut se décomposer en 3 parties : les études, les travaux et l'entretien. Cependant, il est difficile de déterminer exactement le coût total et le coût de chaque phase étant donné que la répartition dépend des spécificités de chaque site, des choix du maître d'ouvrage, des études complémentaires (exemple : études géotechniques, fondations...), etc...

VII. 2. 1. Études

Le coût associé aux études est très variable et dépend de nombreux paramètres tels que la complexité du site, l'exigence du maître d'ouvrage, l'avancement du projet, les imprévus, etc..... La part associée aux études varie généralement entre **10 et 20 %** du coût des travaux.

VII. 2. 2. Travaux

Le coût des travaux pour chaque ouvrage est quantifié grâce au rapport d'ECOGEA qui propose plusieurs formules pour chaque type de passes. Toutes les formules citées, ci-dessous, sont issues du rapport.

- ECOGEA propose trois formules pouvant être utilisées sur toutes les passes. La première formule présentée est applicable à tous les seuils (1), la deuxième aux chutes inférieures à 1,5 m (2) et la troisième aux chutes supérieures à 1,5 m (3). Elles se calculent toutes grâce à la hauteur de chute et au module :

(1) Hauteur de chute et module : $r^2 = 0,77$ ($p < 0,05$)

$$\text{Coût travaux (K€)} = 51,41 (\pm 33,6) \times \text{Hauteur de chute (m)} + 4,95 (\pm 1) \times \text{Module (m}^3/\text{s)}$$

(2) Hauteur de chute < 1,5 m et module : $r^2 = 0,78$ ($p < 0,05$)

$$\text{Coût travaux (K€)} = 31,8 (\pm 9,1) \times \text{Hauteur de chute (m)} + 4,4 (\pm 1,15) \times \text{Module (m}^3/\text{s)}$$

(3) Hauteur de chute > 1,5 m et module : $r^2 = 0,78$ ($p < 0,05$)

$$\text{Coût travaux (K€)} = 58,9 (\pm 29,8) \times \text{Hauteur de chute (m)} + 4,3 (\pm 0,94) \times \text{Module (m}^3/\text{s)}$$

- Le rapport présente ensuite trois formules adaptées uniquement aux passes à bassins. Seulement deux d'entre-elles sont retenues car la troisième prend en compte le volume de génie civil de la future passe. Cette donnée est, à ce stade de l'étude, difficile à obtenir :

(4) Hauteur de chute et module :

$$\text{Coût travaux (K€)} = 54,1 (\pm 28,5) \times \text{Hauteur de chute (m)} + 3,45 (\pm 0,87) \times \text{Module (m}^3/\text{s)}$$

(5) Hauteur de chute et débit dans la passe :

$$\text{Coût travaux (K€)} = 161,58 (\pm 19,9) \times Q_{PAB} (\text{m}^3/\text{s}) \times \text{Hauteur de chute (m)}$$

- Cinq formules spécifiques aux passes en enrochements sont déterminées. Trois d'entre elles seront retenues car les deux autres prennent en compte le volume de génie civil et de blocs de la future passe.

(6) Hauteur de chute et débit dans la passe :

$$\text{Coût travaux (K€)} = 93,02 (\pm 28,6) \times \text{Hauteur de chute (m)} + Q_{Passe} (\text{m}^3/\text{s})$$

(7) Relation entre la surface de la passe en enrochement et le coût total : $r^2 = 0,88$ ($p < 0,05$)

$$\text{Coût travaux (K€)} = 0,688 (\pm 0,13) \times \text{Surface}_{Passe} (\text{m}^2)$$

(8) Relation entre la longueur de la passe en enrochement et le coût total : $r^2 = 0,74$ ($p < 0,05$)

$$\text{Coût travaux (K€)} = 4,33 (\pm 1,31) \times \text{Longueur}_{Passe} (\text{m})$$

- Concernant les rivières de contournement (RC), une seule formule est proposée par le pôle éco-hydraulique d'ECOGEO. La formule dépend de la largeur du bras et de la pente. Ce sont des paramètres difficilement quantifiables. Un impact sur les résultats de l'outil d'estimation des coûts est envisageable.

(9) Largeur et pente de la RC : $r^2 = 0,92$ ($p < 0,05$)

$$\text{Coût travaux (K€)} = 93,02 (\pm 28,6) \times \text{Hauteur de chute (m)} + Q_{Passe} (\text{m}^3/\text{s})$$

Nota : L'outil d'estimation du coût formulé par ECOGEA a été rédigé en 2015. Les coûts calculés avec la méthode d'ECOGEA sont donc aujourd'hui obsolètes en raison de l'inflation des prix du marché. C'est pourquoi, l'outil remanié prend en compte l'évolution de l'indice des travaux publics (TP02) mis à jour chaque mois sur le site de l'INSEE.

VII. 2. 3. Entretien

Le coût d'entretien associé à chaque dispositif de franchissement dépend de la fréquence d'entretien, du coût d'un technicien rivière et de la durée de vie du dispositif.

Concernant la fréquence d'entretien, la figure ci-dessous issue du Guide passes à poissons produit par les VNF présente les modalités d'inspection. Le coût d'un technicien rivière par jour est d'environ 500€/jour. La durée de vie d'un ouvrage de franchissement dépend grandement des matériaux utilisés (béton, enrochements, etc...). L'ordre de grandeur actuel de la durée de vie du béton immergé est aux alentours de 50 ans d'après la bibliographie.

Néanmoins, étant donné que l'intérêt porté à la restauration de la continuité écologique est récent (Loi sur l'eau et des milieux aquatiques de 2006) il y a peu de recul sur la pratique, l'état et le vieillissement des ouvrages. Les valeurs choisies sont donc des ordres de grandeur.



Figure 57 : Synthèse schématique des trois niveaux d'inspection (Guide VNF – 2008, p.50)

Tableau 18 : Tableau récapitulatif des coûts d'entretien

Dispositifs de franchissement	Fréquence d'entretien	Jour d'entretien / an (2 techniciens)	Coût d'entretien /an	Durée de vie (années)	Coût d'entretien total
Rivières	Rare	2	2 000 €	40	80 000 €
Pré-barrages	Moyen	3	3 000 €	30	90 000 €
Passes en enrochements régulièrement répartis	Élevé	4	4 000 €	30	120 000 €
Passes en enrochements jointifs	Rare	2	2 000 €	30	60 000 €
PAB à « jet de surface »	Élevé	4	4 000 €	50	200 000 €
PAB à « jet plongeant »	Moyen	3	3 000 €	50	150 000 €

VII. 3. Résultats

L'objectif principal de cette étude basée sur l'estimation du coût des dispositifs de franchissement, est de proposer au maître d'ouvrage un outil supplémentaire pour l'accompagner dans sa prise de décision. Il est évident qu'il est difficile de déterminer le coût exact d'un ouvrage de franchissement, sans faire d'étude préalable. Cet indicateur économique n'a pas cette prétention mais permet tout de même de donner un ordre de grandeur, une fourchette, une estimation du prix et un classement du coût des différentes passes. Si l'étude sur FisPRO propose plusieurs passes adaptées sur le site d'étude, ce critère permettra alors peut-être de trancher.

Afin de tester le fonctionnement de l'outil d'estimation des coûts, 10 dispositifs parmi les 42 sélectionnés pour la vérification de l'outil FisPRO ont été utilisés. Le nombre de cas consulté semble faible mais il n'y

avait pas davantage d'étude comportant un descriptif des coûts de travaux. D'après les résultats obtenus (voir tableau ci-dessous), toutes les passes sont dans l'intervalle calculé grâce aux formules déterminées par ECOGEA. 8 études ont des coûts de travaux compris entre la valeur minimum et moyenne et 2 études ont des coûts entre la valeur moyenne et maximale. Il est difficile de déterminer avec si peu de cas si l'outil est fonctionnel, les facteurs qui induisent une différence et s'il est possible de diminuer les intervalles dans certains cas de figure.

Dispositifs de franchissement	Année	Source	Coût travaux de l'étude (H.T.) K€	Coût calculé outil ECOGEA (H.T.)		
				Minimum	Moyen	Maximum
				K€	K€	K€
Rivière de contournement	2018	SINBIO - Moulin Gabet	335	334	569	764
	2018	ARTELIA - Goersdorf	228	131	269	391
Enrochement régulièrement réparties	2015	VNF - Barrage de Thoraise	220	111	254	479
	2016	IRH - Champagne	95	23	56	98
Enrochement périodique ou pré-barrages	2021	NCA - Musée de l'électrification	43	20	69	137
	2016	NCA - Moulin de Bas à Marquèze	102	25	73	117
Passes à bassins à échancrures profondes	2014	NCA - Moulin Laurent	40	31	108	157
	2019	ARTELIA - Barrage de Moncey	160	97	185	281
	2015	DYNAMIQUE HYDRO - Barrage de Til-Châtel	108	64	164	256
	2015	VNF - Barrage de Thoraise	199	122	268	466

Tableau 19 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus sur les 10 cas étudiés

Nota : La valeur moyenne est obtenue grâce à l'application de la formule des moyennes pondérées par le coefficient de détermination linéaire de Pearson associé à chaque formule donnée dans le rapport d'ECOGEA.

VII. 4. Acquisition de la donnée

Les données nécessaires au calcul des formules d'estimation du coût sont la hauteur de chute, le module, la longueur et la largeur de la passe. Il s'avère que ces quatre paramètres sont préalablement déterminés lors du calcul des critères. La méthode pour obtenir ces données est décrite en annexe 11. À partir de ces paramètres de base, il est ensuite possible de calculer des paramètres secondaires utiles au calcul du coût :

- Le débit minimum de la passe qui est, d'après la réglementation, au moins égale à $1/10^e$ du module ;
- La pente à partir de la hauteur de chute et de la longueur de la passe ;
- La surface de la passe à partir de la longueur et de la largeur.

VII. 5. Analyse critique et incertitudes de l'outil

L'outil d'estimation du coût peut être considéré comme une extension du modèle FisPRO puisqu'il permet d'ajouter un paramètre supplémentaire à la prise de décision. L'outil peut ainsi être utilisé pour départager d'un point de vue financier des ouvrages qui, d'après les résultats de FisPRO peuvent être implantés sur le site. Cet outil intervient donc dans un second temps, en appui ou en complément aux affirmations apportées par la première méthode. De plus, son utilisation a l'avantage de ne nécessiter aucune donnée supplémentaire puisqu'il se base sur les paramètres déterminés pour créer les critères utilisés sur FisPRO.

Néanmoins, l'étude menée par ECOGEA pour déterminer les formules est à large échelle et propose donc des intervalles de coût pouvant varier de 200% entre le minimum et le maximum. Afin d'optimiser les formules, une sélection plus adaptée des dispositifs aurait pu être envisagée en excluant ceux implantés sur les grands cours d'eau, ayant des grandes chutes ou ceux ayant un dimensionnement en contradiction avec la bibliographie. Nous avons ainsi contacté les rédacteurs du rapport dans l'espoir d'avoir accès à la base de données, mais sans réussite, puisque le droit appartient à l'OFB et aux agences de l'eau et que nous faisons partie d'un organisme privé. De plus, par manque de temps et de cas d'études chiffrés, seul dix cas ont été utilisés pour vérifier si l'outil était fonctionnel. Il serait sûrement nécessaire d'en traiter davantage pour améliorer la robustesse du modèle et réduire les intervalles.

VIII. ESTIMATION DU TEMPS NECESSAIRE POUR APPLIQUER LA METHODE

L'outil d'aide à la décision basé sur l'utilisation du logiciel FisPRO et l'outil d'estimation du coût se doivent d'être efficace, performant et peu chronophage afin d'apporter une réelle plus-value aux études d'ingénierie. Afin de vérifier ces critères, plusieurs tests chronométrés ont été effectués.

Ces tests ont pour objectif de déterminer une estimation du temps moyen nécessaire pour :

- Comprendre la méthode à partir de la « Fiche procédure FisPRO » présentée en annexe 11 et de prendre en main les différentes interfaces :
 - Feuille Excel permettant d'obtenir la valeur associée aux 4 critères à partir de différentes données et le coût global de chaque dispositif ;
 - Fichier FisPRO permettant de déterminer, en fonction des valeurs de chaque critère, quels dispositifs peuvent être implantés sur le site d'étude.
- Acquérir les données nécessaires à la mise en œuvre de la méthode ;
- Utiliser les interfaces afin d'obtenir un résultat.

VIII. 1. Estimation du temps de recherche des données

Afin d'estimer le temps nécessaire pour trouver l'ensemble des données utiles à la création des critères, plusieurs sites d'étude ont été utilisés. Les résultats sont relativement variables et dépendent grandement des informations disponibles dans le CCTP. Si celui-ci regroupe la majorité des données (hauteur de chute, espèce dimensionnante, etc...) il suffit de consulter Géoportail pour les surfaces d'implantations et la Banque Hydro pour obtenir les paramètres hydrologiques. Sinon il faut prendre le temps de chercher davantage, émettre des hypothèses ou poser des questions au maître d'ouvrage. D'autre part, selon le nombre d'ouvrages dans l'étude il est possible de faire des économies d'échelle et de gagner un temps considérable. Le temps nécessaire à la recherche des données peut donc varier entre 5 minutes et plusieurs jours si on attend la réponse d'un maître d'ouvrage mais oscille en moyenne autour de **10 minutes**.

VIII. 2. Estimation du temps de prise en main et d'utilisation

Afin d'estimer le temps de prise en main et d'utilisation des différentes interfaces, deux cas d'études concrets ont été proposés à 3 ingénieurs de l'agence dans le secteur hydraulique fluvial (E. Noisette, C. Soulas et G. Pasquier). Les cas étaient inspirés d'étude réelle. Afin de séparer le temps nécessaire à la recherche de données et le temps d'utilisation de la méthode, les données furent alors fournies. D'après leurs retours la **prise en main est estimée entre 10 et 20 minutes** et **l'utilisation de la méthode entre 5 et 10 minutes**. Il est important de noter que le temps de prise en main des différents outils n'est nécessaire qu'au cours de la première utilisation et qu'ensuite il disparaît. Après la première utilisation, le temps nécessaire pour mettre en œuvre la méthode varie donc entre **15 et 20 minutes**.

IX. CONCLUSION ET OUVERTURE

Conclusion

Les outils développés traitent la problématique de la restauration de la continuité écologique et permettent d'orienter le choix du décideur vers un ou plusieurs types de dispositifs de franchissement à implanter sur un obstacle à la continuité écologique. Le résultat obtenu n'a donc pas pour objectif d'apporter, au décideur, une réponse unique et absolue mais de lui proposer des pistes de solutions sur la base de la littérature technique encadrant la définition et le dimensionnement des passes à poissons.

La méthode permet ainsi d'effectuer le pré-diagnostic synthétisé d'un site d'étude mais n'a pas pour vocation de remplacer le diagnostic et l'étude détaillée car elle ne permet pas d'étudier, de manière pertinente, l'ensemble des cas d'étude. Le modèle est limité à un domaine d'application particulier puisqu'il compare uniquement six types de dispositifs de franchissement, n'est adapté qu'au cours d'eau ayant des gabarits suffisamment conséquents pour pouvoir effectuer des mesures sur Géoportail et n'englobe pas les ouvrages ayant des hauteurs de chute supérieures à cinq mètres.

L'outil d'aide à la décision produit est intuitif, pratique et rapide d'utilisation. Les données d'entrée des différents outils sont simples à obtenir ou à déterminer et ne nécessitent pas d'études poussées ou de mesures sur le terrain. La caractérisation des différents sites se fait grâce aux paramètres biologiques et physiques mais ne prend pas en compte le contexte, les contraintes particulières du site, les critères qualitatifs et les attentes du maître d'ouvrage. C'est pourquoi, l'utilisation de la méthode ne semble adaptée et pertinente qu'en début d'étude, en phase d'appel d'offres ou en phase d'avant-projet sommaire. L'application de la méthode ne nécessite pas de connaissance particulière en hydraulique fluviale. Un utilisateur lambda, comme un technicien par exemple, peut donc, en suivant la « Fiche procédure FisPRO » en [annexe 11](#), déterminer le ou les types de dispositifs pouvant être implantés. D'après l'étude menée sur l'estimation du temps nécessaire pour l'exécuter, il faut en moyenne **10 à 20 minutes** pour prendre en main les différents outils lors de la première utilisation, **10 minutes** pour trouver les données d'entrée et **5 à 10 minutes** pour obtenir des résultats cohérents. De plus, malgré de nombreuses incertitudes sur les paramètres, le modèle semble relativement robuste puisque l'étude menée sur les incertitudes évalue une précision du résultat comprise entre **88 et 97 %**.

Les outils développés, sur le logiciel FisPRO et à partir de rapport d'estimation du coût d'ECOGEA, ont également la particularité d'être modulables et évolutifs. Ils peuvent être améliorés et recalés en fonction des attentes des différents partis et être adaptés aux nouvelles réglementations et aux innovations technologiques.

Afin de rendre le modèle plus performant et d'en faire un outil intéressant, il serait nécessaire de le rendre plus « intelligent » afin qu'il puisse évoluer et prendre des décisions par lui-même. Lorsqu'un expert effectue un diagnostic, il se base en partie sur ses connaissances techniques mais aussi sur son expérience, ses habitudes et ses interlocuteurs. Dans l'état actuel, le modèle a intégré la majorité des connaissances techniques, mais se limite à cette seule facette lorsqu'il résout un problème axé sur la thématique de la restauration de la continuité écologique. Il ne prend pas en compte le contexte de l'étude et les objectifs ou les enjeux sous-jacents.

Ouverture :

Plusieurs optimisations peuvent être envisagées afin d'améliorer les différents outils existants. Concernant le modèle construit sur FisPRO, une fonction de « Deep learning » est incorporée au logiciel. Il serait pertinent de développer et de programmer cette extension afin de pouvoir intégrer davantage de cas d'étude au modèle et le rendre plus performant. Il serait également judicieux d'ajouter un ou plusieurs critères. Un critère axé sur la prise en compte de la largeur du cours d'eau à l'amont du seuil permettrait d'incorporer la notion d'attractivité au modèle et donc d'adapter le dispositif de franchissement au gabarit du cours d'eau. Il pourrait également être envisagé d'améliorer le critère n°3 (Hauteur de chute) en ajoutant un troisième sous-ensemble flou pour les chutes à faible hauteur.

Ces optimisations sont chronophages puisqu'elles augmentent de façon considérable le nombre de règles à renseigner. Pour finir, il pourrait être envisagé d'étudier davantage de cas d'études concrets afin de rendre le modèle plus robuste.

Concernant l'outil d'estimation des coûts des travaux développés par ECOGEA, il serait bénéfique d'avoir accès à la base de données utilisée pour la construction de l'outil afin de faire une nouvelle sélection des passes dans l'optique de l'adapter à notre cas d'étude. Cela permettrait également d'améliorer la robustesse du modèle et sans doute de réduire les intervalles des coûts proposés.

X. BIBLIOGRAPHIE

- Thème : Écosystèmes aquatiques, Continuité écologique, Aménagements des eaux

[1] LARINIER M., PORCHER J.P., TRAVADE F., GOSSET C. - Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement - CSP, PARIS, 1992, CEMAGREF BORDEAUX APBX, COLL. MISE AU POINT – CSP, EDF, INRA SAINT PEE SUR NIVELLE, ONEMA – p. 336 - ISBN : 2-11-088083-X

[2] LARINIER M., COURRET D., GOMES P – Guide technique pour la conception des passes « NATURELLES » : Rapport GHAAPPE RA.06.05 - AEAG, Compagnie nationale du Rhône, CSP, Conseil supérieur de la pêche, Groupe d'hydraulique appliquée aux aménagements piscicoles et à la protection de l'environnement, CEMAGREF, INP ENSEEIHT – 2006 – p.67

[3] AIGOUI F., DUFOUR M. - Guide passes à poissons - Voies Navigables de France – 2008 – p.78– ISSN : 2417-9701

[4] MALAVOI J.R., SALGUES D. - Arasement et dérasement de seuil - Rapport V0 - Pôle hydroécologie des cours d'eau - ONEMA – CEMAGREF – 2011 – p.83

[5] WEIBEL D., PETER A., SCHLEISS A. - Franchissabilité des rampes en enrochements - Office fédéral de l'environnement (OFEV) Suisse – Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau - 2012 – p.6

[6] BAUDOIN J.M., BURGUN V., CHANSEAU M., LARINIER M., OVIDIO M., SREMSKI W., STEINBACH P., VOETGLE B. - Informations sur la continuité écologique (ICE): Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. - ONEMA, UNIVERSITE DE LIEGE, ECOGEA – 2014 - p.204 - ISBN : 979-10-91047-29-6

- Thème : Hydraulique

[7] VASQUEZ J. et DUFRESNE M. – Hydraulique à Surface Libre –2016 – p.154

- Thème : Aide à la décision

[8] MARTIN C., LEGRET M. - La méthode multicritère ELECTRE III : Définitions, principe et exemple d'application à la gestion des eaux pluviales en milieu urbain - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - 2005 – p.18

[9] ROY B., BOUYSSOU D. - Aide multicritère à la décision : méthodes et cas - London School of Economics and Political Science -1993 – p.17 à 64 - ISBN : 2-7178-2473-1

[10] FisPro : Un logiciel dédié aux systèmes d'inférence floue – GUILLAUME S., CHARNOMORDIC B., IRSTEA, UMR ITAP, INRA, UMR MISTEA – 2018 – p.57

- Thème : Économie

[11] BARAN P., COURRET D., VOETGLE B. - Mise au point d'outils d'estimation du coût des passes à poissons –Pole Eco-hydraulique ECOGEA, IRSTEA, ONEMA, INP – 2015 – p.82

XI. GLOSSAIRE

Généralités :

La définition des différents termes provient, en partie, de l'ouvrage Guide passes à poissons des Voies Navigables de France rédigé en 2008 par F. AIGOUÏ et M. DUFOUR :

Activité de croisière : peut être maintenue pendant des heures, 2 à 3 fois la longueur du poisson par seconde.

Activité de pointe ou de « sprint » : peut être maintenue un temps limité, 8 à 10 fois la longueur du poisson par seconde.

Activité de nage soutenue : peut être maintenue pendant plusieurs minutes ou dizaines de minutes.

AFB : était un établissement public à caractère administratif créé par la loi sur la reconquête de la biodiversité du 8 août 2016. Elle s'inscrit dans la volonté de mutualisation et de simplification administrative des gouvernements qui l'ont mise en place.

Amphibiotiques / Amphihalins : Poisson dont le cycle de développement se déroule en partie en eau douce et en partie en eau de mer.

Amphidrome : Un poisson amphidrome se déplace entre eau douce et eau salée à une certaine époque de sa vie mais pas pour se reproduire.

Anadrome : Un poisson anadrome vit le plus souvent en eau de mer mais se reproduit en eau douce.

Benthique : Qualifie les organismes qui vivent et se déplacent à proximité du fond d'un cours d'eau.

Catadrome : Un poisson catadrome vit le plus souvent en eau douce mais se reproduit en eau de mer.

Cyprinidé : Poisson de la famille des Cyprinidae, (exemple gardon, carpe, rotengle).

DCE : Directive Cadre sur l'Eau. Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000.

DDT : Direction Départementale des Territoires.

Dévalaison : Action pour un poisson migrateur de descendre un cours d'eau pour retourner dans un lieu nécessaire à son développement (lieu de reproduction ou de grossissement).

Diadrome : Un poisson diadrome est un poisson vivant alternativement en eau de mer et en eau douce.

Échelle à poissons : Terme ancien désignant un dispositif destiné à permettre le franchissement d'un ouvrage hydraulique par les poissons migrateurs, principalement de l'aval vers l'amont ; on parle plutôt de passe à poissons pour désigner un aménagement adapté à certaines espèces exigeantes ou à plusieurs types de comportement migratoire. Le "régime des échelles à poisson" vise les ouvrages soumis aux obligations découlant du classement au titre de l'article L232-6 du code rural.

Espèce piscicole dimensionnante : Espèce piscicole qui aura les caractéristiques de franchissement les plus contraignant. Cette espèce déterminera le type d'ouvrage à implanter et ses dimensions.

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

Hauteur de chute : Différence altimétrique entre le plan d'eau amont et aval au niveau d'un obstacle.

Holobiotiques : Se dit d'une espèce animale dont le cycle de vie est réalisé dans un seul milieu (la mer ou l'eau douce pour les poissons).

Hydrologie : Étude du cycle de l'eau comprenant l'estimation des différents flux avec au sens large la climatologie, l'hydrologie de surface, l'hydrodynamique des milieux non saturés et l'hydrodynamique souterraine. D'une façon plus restrictive, l'hydrologie traite essentiellement des problèmes qualitatifs et quantitatifs des débits des cours d'eau.

ICE : Informations sur la continuité écologique. Je fais référence à cet acronyme via le rapport intitulé Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons : Principes et méthodes - Informations sur la continuité écologique rédigé par l'ONEMA en 2012. L'ouvrage présente les enjeux de la continuité écologique et la méthode d'évaluation permettant de diagnostiquer le risque d'entrave au déplacement des poissons migrateurs dans les cours d'eau de France métropolitaine. Ce protocole ICE est défini comme une méthodologie nationale standardisée à destination des acteurs de l'environnement et de l'aménagement du territoire, des scientifiques, des bureaux d'études ou encore des enseignants.

INRA : Institut national de la recherche agronomique était un organisme français de recherche en agronomie existant de 1946 à 2019. L'institut fusionne le 1^{er} janvier 2020 avec l'IRSTEA pour former l'INRAE.

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement est un établissement public à caractère scientifique et technologique français sous la tutelle conjointe du ministère chargé de la Recherche, l'Enseignement supérieur, la Recherche et l'Innovation et de celui chargé de l'Agriculture et de l'Alimentation.

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques est chargé de la production, de l'analyse et de la publication des statistiques officielles en France, depuis 1946.

IRSTEA : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture était un établissement public à caractère scientifique et technologique français de recherche dans le domaine de l'environnement et de l'agriculture. L'IRSTEA a fusionné avec l'INRA le 1^{er} janvier 2020.

LEMA : La loi sur l'eau et les milieux aquatiques est une loi française ayant pour fonction de transposer en droit français la directive cadre européenne numéro 60 sur l'eau d'octobre 2000, afin d'arriver aux objectifs qu'elle a posés (bon état des eaux d'ici 2015, amélioration des conditions d'accès à l'eau pour tous, plus de transparence au fonctionnement du service public de l'eau, rénovation de l'organisation de la pêche en eau douce, etc...).

Migrateurs (poissons) : Poissons qui se déplacent périodiquement entre leur zone de reproduction et leurs zones de développement (lieu de vie des juvéniles et des adultes). Certaines espèces vivent alternativement en eau douce et en eau de mer (poissons amphihalins) ; on les appelle "grands migrateurs". Les poissons migrateurs sont classés selon le schéma suivant :

- Un poisson diadrome est un poisson vivant alternativement en eau de mer et en eau douce.
- Un poisson anadrome vit le plus souvent en eau de mer mais se reproduit en eau douce.
- Un poisson catadrome vit le plus souvent en eau douce mais se reproduit en eau de mer.
- Un poisson amphidrome se déplace entre eau douce et eau salée à une certaine époque de sa vie mais pas pour se reproduire.
- Un poisson potamodrome migre mais uniquement en eau douce.

Montaison : Action de remonter un cours d'eau pour un poisson migrateur afin de rejoindre son lieu de reproduction ou de développement.

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques est un ancien établissement public français de référence, sous tutelle du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, créé par la loi sur l'eau du 30 décembre 2006 pour accompagner la mise en œuvre de la politique publique de l'eau en France comme l'y engage la DCE. Il a été dissous fin 2016, pour devenir l'une des directions de l'Agence Française pour la biodiversité (AFB).

PAB : Passes à bassins construit en génie civil (béton armé).

Passé à canoës : Dispositif construit sur les ouvrages transversaux en rivière (seuils, petits barrages) et destiné à permettre le passage des canoës sans discontinuité entre l'amont et l'aval de l'ouvrage (glissière à canoës).

Passé à poissons : Dispositif implanté sur un obstacle naturel ou artificiel (barrage) qui permet aux poissons migrateurs de franchir ces obstacles pour accéder à leurs zones de reproduction ou de développement.

Potamodrome : Un poisson potamodrome migre mais uniquement en eau douce.

RC : rivière de contournement

Réseau hydrographique : Ensemble des milieux aquatiques (lacs, rivières, eaux souterraines, zones humides, etc.) présents sur un territoire donné, le terme de réseau évoquant explicitement les liens physiques et fonctionnels entre ces milieux.

Rhéophile : Qualifie les organismes aquatiques qui vivent dans les milieux où existe un courant important.

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Issu de la loi sur l'eau de 1992, le Schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) est le document d'orientation de la politique de l'eau au niveau local : toute décision administrative doit lui être compatible.

Salmonidés : Poisson appartenant à la famille des Salmonidae, par exemple le saumon atlantique, la truite et l'omble.

SANDRE : Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau. Le SANDRE est un service français qui élabore le langage commun des données et référentiels sur l'eau pour le Système d'information sur l'eau (SIE).

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Créé par la loi sur l'eau de 1992, le SDAGE fixe pour chaque bassin hydrographique les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau dans l'intérêt général et dans le respect des principes de la loi sur l'eau. Ce document d'orientation s'impose aux décisions de l'Etat, des collectivités et établissements publics dans le domaine de l'eau notamment pour la délivrance des autorisations administratives. Les documents de planification en matière d'urbanisme doivent être compatibles avec les orientations fondamentales et les objectifs du SDAGE. Les SDAGE approuvés en 1996 devront être révisés afin d'intégrer les objectifs et les méthodes de la DCE, ils incluront notamment le plan de gestion requis par la directive cadre.

SIE : Le système d'information sur l'eau a pour objectifs le recueil, la conservation et la diffusion des données et des indicateurs sur l'eau, les milieux aquatiques, leurs usages et les services publics de distribution d'eau et d'assainissement.

Glossaire FisPRO :

Assertion : Proposition, de forme affirmative ou négative, qu'on avance et qu'on donne comme vraie (Source : Larousse).

Ensemble flou : Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance. Un point de l'univers « X » appartient à un ensemble « A » avec un degré d'appartenance : $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$

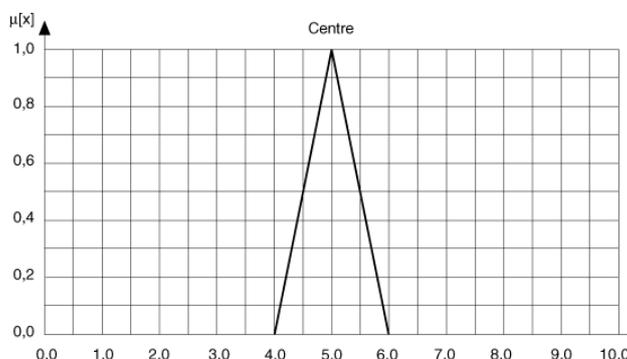


Figure 58 : Ensemble flou de forme triangulaire

Inférence : Opération par laquelle on passe d'une assertion considérée comme vraie à une autre assertion au moyen d'un système de règles qui rend cette deuxième assertion également vraie (Source : Larousse).

Règle floue : Une règle floue est de la forme « Si je rencontre telle situation Alors j'en tire telle conclusion ». La situation, appelée prémisse ou antécédent de la règle, est définie par une combinaison de relations pour chacune des composantes du vecteur d'entrée. La partie conclusion de la règle est appelée conséquence, ou encore simplement conclusion (Site FisPRO).

Sous-ensemble-floue (SEF) : La théorie des sous-ensembles flous est une théorie mathématique du domaine de l'algèbre abstraite. Elle a été développée par Lotfi Zadeh en 1965 afin de représenter mathématiquement l'imprécision relative à certaines classes d'objets et sert de fondement à la logique floue (Source : Wikipédia – Ensemble flou). Dans notre cas, les SEF correspondent aux ensembles associés aux variables linguistiques des entrées.

Système d'inférence floue : Un système d'inférence floue est formé de trois blocs. La fuzzification qui transforme les valeurs numériques en variable linguistique. Le moteur d'inférence, constitué de l'ensemble des règles. La défuzzification qui permet, si nécessaire, d'inférer une valeur nette.

Variable linguistique : Une variable linguistique est associée à un concept linguistique (exemple : faible, moyen, élevé). Les ensembles flous assurent ensuite la correspondance avec l'univers numérique.

XII. SOURCES SITES INTERNET

- Source : Cadre du projet

<https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/0000000015dd1d449ed5eb00a29ee19>

<http://www.graie.org/eaumelime/meli-melo/questions/la-continuite-ecologique/>

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle_%C3%A0_poissons#Objectifs

<https://www.observatoire-poissons-seine-normandie.fr/les-rivieres/les-impacts/les-seuils-et-barrages/>

<http://www.hydrauxois.org/2014/08/un-guide-onema-2014-sur-la.html>

<http://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/guide-technique-pour-conception-passes-poissons-naturelles>

https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/dp17_michel-larinier.pdf

- Source : Logiciel FisPRO

<https://www.aspexit.com/la-logique-floue-ou-lextension-de-la-logique-classique/>

<http://produ.chez.com/akhi/index.htm>

<https://www.fispro.org/documentation/fr/aide-enligne/node39.html>

- Source des figures :

Figure 5 : Schéma d'un système d'inférence floue (Site FisPRO.org)

<https://www.fispro.org/documentation/fr/aide-enligne/node39.html>

Figure 6 à 11 :

<https://www.aspexit.com/la-logique-floue-ou-lextension-de-la-logique-classique/>

Figure 12: Schéma de fonctionnement des passes à "jet de surface"

https://cassiopee.g-eau.fr/assets/docs/fr/calculators/structures/lois_ouvrages.html

Figure 13 : Schéma de principe illustrant la protection des passes contre les cors flottants

(Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement - ONEMA – 1992)

Figure 19 : Passe à "jet plongeant" sur le ruisseau du Fondagny (69)

https://www.contratderivieredugaron.fr/Renovation-de-la-passe-a-poissons-du-Fondagny_a240.html

Figure 20 : Schéma de fonctionnement des pré-barrages

<http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2015/passes-poissons-et-implantation>

Figure 21 à 25 : Guide technique pour la conception des passes « NATURELLES » - GHAPPE - 2006

Figure 27 : Photographie avant/après de la rampe à enrochements régulièrement répartis de Marignier sur la Griffe

<https://www.pechehautesavoie.com/avancement-des-travaux-a-marignier/>

Figure 29 : Rampe en enrochements jointifs sur la Dore à Thiers (Eurovia)

<https://www.eurovia.fr/agences/5082-cognac-tp/actualites/le-seuil-autoroutier-de-la-dore-preserve-son-ecosysteme>

Figure 32 et 33 :

<https://www.saumon-rhin.com/decouverte/passes-a-poissons/riviere-de-contournement/>

Figure 34 : Rivière de contournement à Châtelais (ICEMA)

<https://icema.fr/passe-a-poissons-chatelais/>

Figure 37 : Passe à ralentisseurs plans de Saint-Alban-Leyse en Savoie

<http://www.pecheurdumorin.fr/2014/10/faune-aquatique-d-ici-et-d-ailleurs-une-passe-a-poissons.html>

Figure 39 : Passe à ralentisseurs de fond (Association Saumon-Rhin)

<https://www.saumon-rhin.com/decouverte/passes-a-poissons/passe-a-ralentisseurs-de-fond/>

Figure 40 : Passes à anguilles de type brosses (Image fournisseur Ichtyologic)

<https://ichtyologic.com/wp-content/uploads/2014/08/brosse-anguille-1.jpg>

Figure 41 : Passe à anguilles à micro-plots ou rugofish à Saint Laurent d'Aigouze et Marsillargues

<https://www.vidourle.org/amelioration-de-la-continuite-biologique-reception-des-travaux-des-seuils-de-saint-laurent-daigouze-et-marsillargues/>

XIII. ANNEXES

Annexe 1 : Contexte réglementaire encadrant l'étude.....	70
Annexe 2 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des dispositifs de franchissement sélectionnés.....	71
Annexe 3 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des espèces piscicoles.....	73
Annexe 4 : Données complémentaires concernant les dispositifs de franchissements piscicoles.....	74
Annexe 5 : Règles floues.....	75
Annexe 6 : Tableau récapitulatif des 42 cas concrets étudiés.....	76
Annexe 7 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus sur FisPRO pour les 42 cas étudiés.....	79
Annexe 8 : Tableau récapitulatif des résultats de la méthode basée sur la comparaison des propositions entre l'étude concrète et l'avis des experts pour 20 cas sélectionnés.....	82
Annexe 9 : Tableau récapitulatif des résultats de la méthode basée sur la comparaison des propositions entre FisPRO et l'avis des experts pour 20 cas sélectionnés.....	84
Annexe 10 : Tableau récapitulatif des résultats de l'estimation des coûts réalisé avec l'outil ECOGEA sur 10 cas d'études.....	86
Annexe 11 : Fiche procédure.....	87

Annexe 1 : Contexte réglementaire encadrant l'étude

Complément d'information concernant l'échelle locale avec le SDAGE du bassin Loire-Bretagne :

Déclinaison locale : Le SDAGE du bassin Loire-Bretagne 2016-2021 a été arrêté le 18 novembre 2015. Il définit 14 orientations fondamentales et dispositions. La problématique de la restauration de la continuité écologique des cours d'eau est définie comme étant la capacité à garantir la libre circulation des espèces biologiques (à la fois dans leurs phases de montaison et de dévalaison) et le transport des sédiments. Ces points sont exprimés aux travers des orientations 1 et 9 :

- 1. Repenser les aménagements de cours d'eau
 - 1C : Restaurer la qualité physique et fonctionnelle des cours d'eau
 - **1D : Assurer la continuité longitudinale des cours d'eau**
- 9. Préserver la biodiversité aquatique
 - 9A : Restaurer le fonctionnement des circuits de migration

La mesure 1D impose que les SDAGE comportent un plan d'actions identifiant les mesures nécessaires à la restauration de la continuité écologique du cours d'eau avec le type de de solution adaptée à chaque ouvrage et un objectif chiffré et daté pour la valeur du taux d'étagement. Toute opération de restauration, modification ou création d'ouvrage transversal dans le lit mineur des cours d'eau doit faire l'objet d'un examen sur l'opportunité du maintien ou de la création de l'ouvrage.

- La mesure 1D définit un ordre de priorité pour les mesures de restauration de la continuité écologique :
 - 1) Effacement ;
 - 2) Arasement partiel et aménagement d'ouvertures (échancrures...), petits seuils de substitution franchissables par conception ;
 - 3) Ouverture de barrages (pertuis ouverts...) et transparence par gestion d'ouvrage (manœuvres d'ouvrages mobiles, arrêts de turbine...)
 - 4) Aménagement de dispositif de franchissement ou de rivière de contournement avec obligation d'entretien permanent et de fonctionnement à long terme.

Complément d'information concernant le contexte réglementaire national (LEMA) :

Liste 1 : cours d'eau pour lesquels aucune autorisation ou concession ne peut être accordée pour la construction de nouveaux ouvrages s'ils constituent un obstacle à la continuité écologique. Cette liste est établie parmi les cours d'eau :

- En très bon état écologique ;
- Ou identifiés par les SDAGE comme jouant le rôle de réservoir biologique nécessaire au maintien ou à l'atteinte du bon état écologique des cours d'eau d'un bassin versant ;
- Ou nécessitant une protection complète des poissons migrateurs amphihalins.

De plus, le renouvellement de la concession ou de l'autorisation des ouvrages existants ne peut se faire que s'ils permettent de maintenir le très bon état écologique des eaux, de maintenir ou d'atteindre le bon état écologique des cours d'eau d'un bassin versant ou d'assurer la protection des poissons migrateurs.

Liste 2 : cours d'eau pour lesquels tout ouvrage existant doit être équipé pour lui permettre d'assurer le transport suffisant des sédiments ou la circulation des poissons migrateurs, dans un délai de 5 ans après la publication de la liste.

Annexe 2 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des dispositifs de franchissement sélectionnés

Ouvrages de franchissement	Avantages	Inconvénients
Passe à « jets de surface » (fentes ou échancrures verticales)	Passes à poissons toutes espèces.	Attractivité limitée nécessitant généralement l'adjonction d'un débit d'attrait.
	Dispositifs adaptés à une large gamme de hauteur de chute, moins d'un mètre à une dizaine de mètres voire plus.	Grande sensibilité vis-à-vis des embâcles, nécessitant la mise en place de protections amont (grilles) et éventuellement de couverture (caillebotis). Dispositifs nécessitant un entretien régulier (grille amont, fentes).
	Très bonne adaptation aux variations de niveau d'eau amont.	Intégration paysagère limitée.
	Bon pouvoir d'adaptation aux contraintes foncières et génie civil en place du fait d'une grande modularité de tracé.	Dispositifs non-adaptables aux usages multiples (canoé, kayak...)
Passe à « jet plongeant » (seuils déversant)	Bonne attractivité ne nécessitant généralement pas d'adjonction de débit complémentaire.	Dispositifs plus particulièrement adaptés aux poissons de surface ou de pleine eau nécessitant l'adjonction d'orifices de fond pour faire passer les espèces benthiques.
	Dispositifs peu sensibles aux embâcles, ne nécessitant que peu d'entretien.	Dispositifs adaptés à de faibles hauteurs de chute (< 2 m).
	Bonne intégration paysagère à la fois en site urbain et naturel.	Dispositif très sensible aux variations de niveau d'eau amont.
	Dispositifs adaptables aux usages multiples (canoé, kayak...)	Faible pouvoir d'adaptation aux contraintes foncières et génie civil en place du fait d'une emprise importante et d'un tracé rectiligne.
Pré-barrages ou passe à enrochements en rangées périodiques	Bonne attractivité ne nécessitant généralement pas d'adjonction de débit complémentaire.	Dispositifs plus particulièrement adaptés aux salmonidés.
	Dispositifs peu sensibles aux embâcles, ne nécessitant que peu d'entretien.	Dispositifs limités aux faibles hauteurs de chute (< 2 m).
	Bonne intégration paysagère à la fois en site urbain et naturel.	
	Dispositif peu sensible aux variations de niveau d'eau amont.	
	Dispositifs s'adaptant à des configurations variées de barrages.	
	Dispositifs adaptables aux usages multiples (canoé, kayak...)	

Ouvrages de franchissement	Avantages	Inconvénients
Passe à enrochements jointifs	Bonne attractivité ne nécessitant généralement pas d'adjonction de débit complémentaire.	Dispositifs plus particulièrement adaptés aux salmonidés et cyprinidés rhéophiles.
	Dispositifs peu sensibles aux embâcles, ne nécessitant que peu d'entretien.	Dispositifs limités aux faibles hauteurs de chute (< 2 m).
	Bonne intégration paysagère à la fois en site urbain et naturel.	Dispositif très sensible aux variations de niveau d'eau amont.
	Dispositifs adaptables aux usages multiples (canoé, kayak...).	Faible pouvoir d'adaptation aux contraintes foncières et génie civil en place du fait d'une emprise importante et d'un tracé rectiligne.
Passe à enrochements régulièrement répartis	Passes à poissons toutes espèces.	Dispositifs limités aux faibles hauteurs de chute (< 2 m).
	Bonne attractivité ne nécessitant généralement pas d'adjonction de débit complémentaire.	Grande sensibilité vis-à-vis des embâcles. Dispositifs nécessitant un entretien régulier (grille amont, fentes).
	Bonne intégration paysagère à la fois en site urbain et naturel.	Faible pouvoir d'adaptation aux contraintes foncières et génie civil en place du fait d'une emprise relativement importante et d'un tracé rectiligne.
	Dispositif peu sensible aux variations de niveau d'eau amont.	Dispositif non-adaptable aux usages multiples (canoé, kayak...).
Rivières de contournement	Dispositifs toutes espèces.	Attractivité limitée nécessitant généralement l'adjonction d'un débit d'attrait.
	Dispositifs adaptés à une large gamme de hauteur de chute, moins d'un mètre à une dizaine de mètres voire plus.	Grande sensibilité vis-à-vis des embâcles nécessitant la mise en place de protections amont (grilles). Dispositifs nécessitant un entretien régulier (grille amont, fentes).
	Bonne intégration paysagère à la fois en site urbain et naturel.	Dispositif relativement sensible aux variations de niveau d'eau amont.
	Dispositifs adaptables aux usages multiples (canoé, kayak...).	Faible pouvoir d'adaptation aux contraintes foncières et génie civil en place du fait d'une emprise importante.

Légende :

Espèces piscicoles
Hauteur de chute
Attractivité
Embâcles

Variation hauteur d'eau amont
Intégration paysagère
Modularité
Usages multiples

Annexe 3 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des espèces piscicoles

Espèces	Groupe	Espèces sauteuses	Vitesse de nage (m/s)			Hauteur de saut (m)			Période de frai	Période de montaison	Période de dévalaison
	ICE		Min	Moyenne	Max	Min	Moyenne	Max	Mois	Mois	Mois
Saumon atlantique Truite de mer ou de rivière (50-100)	1	Oui	4,5	5,5	6,5	1	1,5	2,5	Novembre - Février	Mars - Décembre	Décembre - Juin
Mulets	2	Oui	4	4,75	5,5	0,8	1,1	1,8	-	-	-
Grande alose,	3a	Non	3,5	4,25	5	-			Mars - Juillet	Mars - Juin	Septembre - Octobre
Alose feinte (avec 3A)	3b	Non	3	3,75	4,5				Mai - Juillet		
Lamproie marine	3c	Non	3	3,75	4,5				Avril - Juillet	Janvier - Aout	Avril - Juillet
Truite de rivière ou de mer (25-55)	4a	Oui	3	4	5	0,5	0,9	1,4	Novembre - Février	Mars - Décembre	Décembre - Juin
Truite de rivière (15-30)	4b	Oui	2,5	3	3,5	0,3	0,5	0,8	Octobre - Février	Aout - Janvier	-
Aspe, brochet	5	Non	3,5	4,25	5	-			Mars - Mai	Janvier - Avril	Mars - Mai
Ombre commun	6	Oui	3	3,75	4,5	0,4	0,75	1,2	Avril - Juin	Février - Février	-
Barbeau fluviatile, chevesne, hotu	7a	Non	2,5	3,25	4	-			Avril - Juillet	Mars - Octobre	Avril - Juillet
Lamproie fluviatile	7b	Non	2	2,75	3,5				Avril - Juin	Septembre - Mai	Avril - Juin
Carpe commune	8a	Non	2	2,75	3,5				Mai - Juillet		Mai - Juillet
Brème commune, Sandre (avec 8a)	8b	Non	2	2,75	3,5				Avril - Aout	Mars - Juin	Avril - Aout
Brème bordelière, ide melanote, lotte, perche, tanche (8b)	8c	Non	2	2,75	3,5				Avril - Aout	Mars - Octobre	Avril - Aout
Vandoise (8b)	8d	Non	2	2,75	3,5				Mars - Mai	Février - Mai	Mars - Mai
Ablette commune, spirilin, barbeau méridional, blageon, carassin commun, carassin argenté, gardon, rotengle, toxostome	9a	Non	1,5	2,25	3				-	-	-
Apron, chabot, lamproie de Planer, goujon, grémille, loche franche, loche de rivière (10a)	9b	Non	1,5	2,25	3	-	-	-			
Able de Heckel, bouvière, épinoche, épinocchette, vairon	10	Non	1	1,5	2	-	-	-			
Anguillettes	11a	Non	-			1,5	Toute l'année (dépend du stade)				
Anguilles jeunes (11)	11b	Non				0,5					

Annexe 4 : Données complémentaires concernant les dispositifs de franchissements piscicoles

Puissance volumique dissipée :

- Puissance dissipée volumique pour les passes à bassins :

(Source internet Cassiopee : <https://cassiopee.g-eau.fr/assets/docs/fr/calculators/pab/volume.html>)

Équation 2 : Puissance volumique dissipée pour les passes à bassins

$$Pv \text{ Bassins} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta H}{V}$$

- Puissance dissipée volumiques pour les passes rustiques et les rivières de contournement :

(Issu du Guide technique pour la conception des passes « Naturelles », Rapport GHAAPE)

Équation 3 : Puissance volumique dissipée pour les passes « naturelles »

$$Pv \text{ Rustiques ou Rivières} = \frac{\rho \cdot g \cdot q \cdot I}{h} = \rho \cdot g \cdot V_{deb} \cdot I$$

Pv : Puissance volumique dissipée (W/m³)

ρ : masse volumique de l'eau

g : accélération de la gravité terrestre

Q : débit dans la passe (m³/s)

q : débit unitaire de la passe (m³/s/m)

ΔH : hauteur de chute entre deux bassins (m)

h : hauteur d'eau dans la passe (m)

V : volume des bassins de la passe (m)

I : pente de du coursier

V deb : vitesse débitante calculée dans les sections libres (m/s)

Pentes admissibles des différents ouvrages de franchissement piscicoles :

Grâce à la documentation bibliographique consultée ([1], [2] et [3]), les pentes limites des différents ouvrages de franchissement ont pu être extraites. Le tableau ci-dessous présent les valeurs retenus :

Dispositifs de franchissement	Pente (%)	
	Minimum	Minimum
Rivières	1	2
Pré-barrages	4	9
Passes en enrochements régulièrement répartis	1	6
Passes en enrochements jointifs	5	10
PAB à « jet de surface »	10	20
PAB à « jet plongeant »	10	20

Annexe 5 : Règles floues

Cette annexe présente les règles floues intégrées au moteur d'inférence afin de modéliser le système d'inférence floue.

Règles Affichage

Règle	Active	SI Espèces dimensionnantes	ET Surface / H chute	ET H chute	ET Variations H eau amont	ALORS Choix PAP
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Faible	Faible	PAB jet plongeant
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Faible	Moyen	Prébarrages
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Faible	Elevé	Prébarrages
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Elevé	Faible	PAB jet surface
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Elevé	Moyen	PAB jet surface
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Faible	Elevé	Elevé	PAB jet surface
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Moyen	Faible	Faible	PAP jointifs
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Moyen	Faible	Moyen	PAP répartis
9	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Moyen	Faible	Elevé	Prébarrages
10	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Moyen	Elevé	Faible	PAB jet surface
11	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Moyen	Elevé	Moyen	PAB jet surface
12	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Moyen	Elevé	Elevé	PAB jet surface
13	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Elevé	Faible	Faible	Rivière
14	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Elevé	Faible	Moyen	Rivière
15	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Elevé	Faible	Elevé	Prébarrages
16	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Elevé	Elevé	Faible	Rivière
17	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Elevé	Elevé	Moyen	Rivière
18	<input checked="" type="checkbox"/>	Faible	Elevé	Elevé	Elevé	PAB jet surface
19	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Faible	Faible	Faible	Prébarrages
20	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Faible	Faible	Moyen	Prébarrages
21	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Faible	Faible	Elevé	Prébarrages
22	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Faible	Elevé	Faible	PAB jet surface
23	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Faible	Elevé	Moyen	PAB jet surface
24	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Faible	Elevé	Elevé	PAB jet surface
25	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Moyen	Faible	Faible	PAP jointifs
26	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Moyen	Faible	Moyen	PAP répartis
27	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Moyen	Faible	Elevé	Prébarrages
28	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Moyen	Elevé	Faible	PAB jet surface
29	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Moyen	Elevé	Moyen	PAB jet surface
30	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé	PAB jet surface
31	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Elevé	Faible	Faible	Rivière
32	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Elevé	Faible	Moyen	Rivière
33	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Elevé	Faible	Elevé	Prébarrages
34	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Elevé	Elevé	Faible	Rivière
35	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Elevé	Elevé	Moyen	Rivière
36	<input checked="" type="checkbox"/>	Moyen	Elevé	Elevé	Elevé	PAB jet surface
37	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Faible	Faible	Faible	Prébarrages
38	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Faible	Faible	Moyen	Prébarrages
39	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Faible	Faible	Elevé	Prébarrages
40	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Faible	Elevé	Faible	PAB jet surface
41	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Faible	Elevé	Moyen	PAB jet surface
42	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Faible	Elevé	Elevé	PAB jet surface
43	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Moyen	Faible	Faible	PAP répartis
44	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Moyen	Faible	Moyen	PAP répartis
45	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Moyen	Faible	Elevé	Prébarrages
46	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Moyen	Elevé	Faible	PAB jet surface
47	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Moyen	Elevé	Moyen	PAB jet surface
48	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Moyen	Elevé	Elevé	PAB jet surface
49	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Elevé	Faible	Faible	Rivière
50	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Elevé	Faible	Moyen	Rivière
51	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Elevé	Faible	Elevé	Prébarrages
52	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Elevé	Elevé	Faible	Rivière
53	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Elevé	Elevé	Moyen	Rivière
54	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	PAB jet surface

Annexe 6 : Tableau récapitulatif des 42 cas concrets étudiés

N°	Dispositifs de franchissement	Année	Source	Nom du cours d'eau	Espèces piscicoles dimensionnantes	Q cours d'eau étiage	Q cours d'eau médian	Q cours d'eau crue	Q passe	Pente	Chute	Largeur du cours d'eau
						m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	%	m	m
1	Rivière de contournement	-	Rapport GHAAPPE p. 38 - Armeniers	Rhône	-	2	10		0,55 à 1,4	2,7	2,5	100
2		-	Rapport GHAAPPE P.39 - Biron	Gave de Pau	-	18	82	730	4 à 5	2	5,2	120
3		-	Rapport GHAAPPE p. 40 - Chatillon sur Lison	Loue	-	6	50	520	1,2	3,5	2,85	120
4		-	Rapport GHAAPPE p. 41 - Lac des Gaves	Gave de Pau	-	8	30	-	1,5 à 4	0,94	16	80
5		-	ONEMA 92 (Larinier) - Holstebro (Danemark)	Stora	-	2	16,1	-	1	0,8	5	25
6		2018	SINBIO - Moulin Gabet	Sarthe	Grande alose, Lamproie marine, Brochet, Bandoise, Barbeau fluviale, Hotu, Spirlin, Truite de rivière	8,8	49,6	536	5	0,82	1,5	60
7		2018	ARTELIA - Goersdorf	Sauer	Lamproie de Planet, Chabot	1	1,9	18,4	0,3	1	2,82	9
8		2015	NCA - Moulin de la Corbelière	Sèvre Niortaise	Alose, Lamproie marine, Anguille	0,59	2,4	50	0,82	1,7	1,2	14
9		2015	NCA - Montreuil-Bonnin	Boivre	Truite fario	0,1	0,5	13,37	0,01	0,1	0,8	11
10		2018	NCA - Moulin de la Pierrière	Clain	Truite de mer, Grande Alose, Lamproie marine	2,9	12,3	110	0,9	2	1,5	40
11		2014	NCA - Moulin Laurent	Layon	Truite fario	0,03	0,08	0,34	0,08	1,39	1,3	6
12	Enrochement jointif	-	Rapport GHAAPPE p.27 - Lescar	Gave de Pau	-	15	72	670	Tout	10	1,5	130
13		-	Rapport GHAAPPE p.28 - Iller (Allemagne)	Iller	-	11	70	650	Tout	6,7	2,83	70
14		-	Rapport GHAAPPE p.34 - Toulouzette	Adour	-	8	65	740	4,5 à 20	5	1,2	60
15		-	Rapport GHAAPPEp. 36 - Belleville	Loire	-	35	329	2700	Tout	10	1,15	100

16		2016	EUROVIA - Seuil autoroutier A89 (Thiers)	Dore	-	2,5	12,7	180	1,3	3,6	1,3	58
17		2018	ARTELIA - Goersdorf	Sauer	Lamproie de Planet, Chabot	1	1,9	18,4	0,3	8	0,35	9
18	Enrochement régulièrement répartis	-	Rapport GHAAPPE p.31 - Carennac	Dordogne	-	12	175	980	4,5 à 20	7,6	1,2	160
19		-	Rapport GHAAPPE p. 32 - Dattenfeld (Allemagne)	Sieg	-	3	21	600	Tout	5	1,8	90
20		-	Rapport GHAAPPE p.33 - Buisdorf (Allemagne)	Sieg	-	3	21	600	-	5	2,65	50
21		2015	VNF - Barrage de Thoraise	Doubs	Chabot, le Brochet et la Vandoise	15,1	52,6	199,5	0,9 à 3	4	1,6	100
22		2015	NALDEO - Abbaye d'Acéy	Ognon	Brochet, Anguille, Lotte de rivière, Chevaîne, Gardon, Brème bordelière	3,6	17	80	3,6	4,2	1,2	30
23		2015	NCA - Moulin de la Corbelière	Sèvre Niortaise	Alose, Lamproie marine, Anguille	0,59	2,4	50	0,82	5	1,2	14
24		2015	NCA - Moulin de la Corbelière	Sèvre Niortaise	Alose, Lamproie marine, Anguille	0,59	2,4	50	0,82	5	1,05	14
25		2016	IRH - Champagney	Près d'Ambiez	Truite Fario, Lamproie de Planet, Chabot	0,028	0,19	8,87	0,028	5	0,75	10
26		2018	ARTELIA - Goersdorf	Sauer	Lamproie de Planet, Chabot	1	1,9	18,4	0,3	2	0,8	9
27		2021	NCA - Musée de l'électrification	Creuse	Truite fario, Lotte et Chabot	0,049	0,03	0,06	0,049 à 0,05	5	1,05	15
28	Enrochement périodique ou pré-barrages	-	Rapport GHAAPPE p. 29 - Ahr (Allemagne)	Ahr	-	0,8	7	230	Tout	3,75	1,9	37
29		-	Rapport GHAAPPE p.35 - Kolbsheim	Bruche	-	0,5	8	150	Indéterminé	5,6	1,4	27
30		-	Rapport GHAAPPE p. 42- Aare (Suisse)	Aare	-	43	122	520	0,7	7,14	2,8	100
31		2014	SMAGGA - Soucieu-en-Jarrest	Garon	Truite fario et barbeau	0,081	0,61	-	0,05	6	2,6	4
32		2019	NCA - Moulin de Buze	Creuse	Truite de rivière	0,176	0,519	16	0,07	10	0,5	5
33		2021	NCA - Musée de l'électrification	Creuse	Truite fario, Lotte et Chabot	0,049	0,3	0,6	0,049 à 0,5	5	1,05	15
34		2016	NCA - Moulin de Bas à Marquèze	Escamat	Lamproie marine, Lamproie fluviatile, Anguille	0,16	0,38	-	0,16	10	1,2	10

TRAVAUX DE FIN D'ETUDES

Outil d'aide à la décision multicritère axé sur la thématique des dispositifs de franchissement piscicole

35		2019	NCA - Moulin-des-Rivailles	Creuse	Lamproie marine, lamproie fluviatile, anguille	0,23	0,67	16	0,1	6	0,76	6
36	Bassins à échantures profondes	2014	NCA - Moulin Laurent	Layon	Truite fario	0,03	0,08	0,34	0,075	8,7	1,61	6
37		2019	ARTELIA - Barrage de Moncey	Ognon	Goujon, Chevesne, Vandoise, Spirlin, Hotu	2,97	13,8	290	1	4,7	2,1	8
38		2015	JACQUEL et CHATILLON - Aulx les Cromary	Ognon	Brochet, Barbeaux et Anguille	3	14,1	303	0,24	6,5	2,68	8
39		2014	SMAGGA - Soucieu-en-Jarrest	Garon	Truite fario et barbeau	0,081	0,61	-	0,05	15	2,5	4
40		2015	DYNAMIQUE HYDRO - Barrage des forges de Til-Châtel	Tille	Truite fario et ombre commun	1	4	-	0,8	11	2,45	32
41		2015	VNF - Barrage de Thoraie	Doubs	Chabot, le Brochet et la Vandoise	15,1	52,6	199,5	1	6	1,6	100
42		2021	NCA - Moulin de la Rche à Gué	Gartempe	Saumon atlantique, truite de mer, grande alose, lamproie marine	2,5	13,6	57	0,8	6,5	1,41	50

Annexe 7 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus sur FisPRO pour les 42 cas étudiés

N°	Source	Espèces piscicoles	Surface / h chute	Chute	Résultats	Proposition 1 FISPRO		Pronostique 2 FISPRO		Pronostique 3 FISPRO		Pronostique 4 FISPRO	
			m ² /m	m		Type PAP	Conditions	Type PAP	Condition	Type PAP	Condition	Type PAP	Condition
1	Rapport GHAAPPE p. 38 - Armeniers	-	200	2,5		PAB jet surface	-	Rivière	Var H amont moyen				
2	Rapport GHAAPPE P.39 -Biron	-	245	5,2		PAB jet surface	-	Rivière	Var H amont moyen				
3	Rapport GHAAPPE p. 40 - Chatillon sur Lison	-	140	2,85		PAB jet surface	-	Rivière	Var H amont moyen				
4	Rapport GHAAPPE p. 41 - Lac des Gaves	-	531	16		PAB jet surface	-	Rivière	Var H amont moyen				
5	ONEMA 92 - Holstebro (Danemark)	-	328	5		PAB jet surface	-	Rivière	Var H amont moyen				
6	SINBIO - Moulin Gabet	Grande alose, Lamproie marine, Brochet, Bandoise, Hotu, Spirlin	600	1,5		PAB jet surface	-	Rivière	Var H amont moyen				
7	ARTELIA - Goersdorf	Lamproie de Planet, Chabot	330	2,82		PAB jet surface	-	Rivière	Var H amont moyen				
8	NCA - Moulin de la Corbelière	Alose, Lamproie marine, Anguille	267	1,2		Prébarrages	-	Rivière	Var H amont moyen				
9	NCA - Montreuil- Bonnin	Truite fario	2813	0,8		Prébarrages	-	Rivière	Var H amont moyen				
10	NCA - Moulin de la Pierrière	Truite de mer, Grande Alose, Lamproie marine	167	1,5		Prébarrages	-	Rivière	Var H amont moyen				
11	NCA - Moulin Laurent	Truite fario	167	1,3		Prébarrages	-	Rivière	Var H amont moyen				
12	Rapport GHAAPPE p.27 - Lescar	-	53	1,5		PAB jet surface	-	Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible

TRAVAUX DE FIN D'ÉTUDES

Outil d'aide à la décision multicritère axé sur la thématique des dispositifs de franchissement piscicole

13	GHAAPPE p.28 - Iller (Allemagne)	-	97		Erreur	PAB jet surface	-						
14	Rapport GHAAPPE p.34 - Toulouzette	-	71	1,2		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
15	Rapport GHAAPPEp. 36 - Belleville	-	87	1,15		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
16	EUROVIA - Seuil autoroutier A89 (Thiers)	-	138	1,3		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	Rivière	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible
17	ARTELIA - Goersdorf	Lamproie de Planet, Chabot	14	0,35	Erreur	Prébarrages	-						
18	Rapport GHAAPPE p.31 - Carennac	-	71	1,2		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
19	Rapport GHAAPPE p. 32 - Dattenfeld (Allemagne)	-	139	1,8		Prébarrages	-	PAB jet surface	-	PAP répartis	Var H amont moyen	Rivière	Var H amont moyen
20	Rapport GHAAPPE p.33 - Buisdorf (Allemagne)	-	123	2,65		PAB jet surface	-	Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible
21	VNF - Barrage de Thoraïse	Chabot, le Brochet et la Vandoise	138	1,6		Prébarrages	-	PAB jet surface	-	PAP répartis	Var H amont moyen	Rivière	Var H amont moyen
22	NALDEO - Abbaye d'Acey	Brochet, Anguille, Lotte de rivière, Chevaine, Gardon, Brème bordelière	121	1,2		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
23	NCA - Moulin de la Corbelière	Alose, Lamproie marine, Anguille	105	1,2		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
24	NCA - Moulin de la Corbelière	Alose, Lamproie marine, Anguille	100	1,05		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
25	IRH - Champagney	Truite Fario, Lamproie de Planet, Chabot	70	0,75		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
26	ARTELIA - Goersdorf	Lamproie de Planet, Chabot	238		Erreur	Prébarrages	-	Rivière	Var H amont moyen				
27	NCA - Musée de l'électrification	Truite fario, Lotte et Chabot	48	1,05		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen				

28	GHAAPPE p. 29 - Ahr (Allemagne)	-	71	1,9		Prébarrages	-	PAB jet surface	-	PAP répartis	Var H amont moyen		
29	Rapport GHAAPPE p.35 - Kolbsheim	-	89	1,4		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen				
30	Rapport GHAAPPE p. 42- Aare (Suisse)	-	48	2,8		PAB jet surface	-	Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible
31	SMAGGA - Soucieu-en-Jarrest	Truite fario et barbeau	17	2,6		PAB jet surface	-	Prébarrages	-				
32	NCA - Moulin de Buze	Truite de rivière	66	0,5		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
33	NCA - Musée de l'électrification	Truite fario, Lotte et Chabot	67	1,05		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
34	NCA - Moulin de Bas à Marquèze	Lamproie marine, lamproie fluviatile, anguille	50	1,2		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
35	NCA - Moulin-des-Rivailles	Truite fario, lotte et chabot	63	0,76		Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		
36	NCA - Moulin Laurent	Truite fario	17	1,61		Prébarrages	-	PAB jet surface	-				
37	ARTELIA - Barrage de Moncey	Goujon, le Chevesne, la Vandoise, le Spirlin, Hotu	64	2,1		PAB jet surface	-	Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible
38	JACQUEL et CHATILLON - Aulx les Cromary	Brochet, Barbeaux et Anguille	22	2,68		PAB jet surface	-						
39	SMAGGA - Soucieu-en-Jarrest	Truite fario et barbeau	7	2,5		PAB jet surface	-						
40	DYNAMIQUE HYDRO - Barrage de Til-Châtel	Truite fario et ombre commun	19	2,45		PAB jet surface	-	Prébarrages	-				
41	VNF - Barrage de Thoraïse	Chabot, le Brochet et la Vandoise	61	1,6		Prébarrages	-	PAB jet surface	-	PAP répartis	Var H amont moyen		
42	NCA - Moulin de la Rche à Gué	Saumon atlantique, truite de mer, grande alose, lamproie marine	47	1,41	Erreur	Prébarrages	-	PAP répartis	Var H amont moyen	PAP jointifs	Espèces 2 et var H amont faible		

Annexe 8 : Tableau récapitulatif des résultats de la méthode basée sur la comparaison des propositions entre l'étude concrète et l'avis des experts pour 20 cas sélectionnés

N°	Année	Source	Proposition étude	E. Noisette				G. Pasquier			
				Proposition 1	Proposition 2	Proposition 3	Remarques	Proposition 1	Proposition 2	Proposition 3	Remarques
1	2018	SINBIO - Moulin Gabet	Rivière	Aménager le bras gauche pour remonter la ligne d'eau	Rivière	PAB jet de surface	2e	Rivière	Prébarrages	Rampe répartis	1er
2	2018	ARTELIA - Goersdorf	Rivière	Rivière	PAB dans le moulin ?		1er	Rivière	PAB Jet de surface	-	1er
3	2015	NCA - Moulin Corbelière	Rivière / Répartis	Rivière	PAB jet de surface	Prébarrages	1er	Rivière	Prébarrages	Rampe répartis	1er
4	2015	NCA - Montreuil-Bonnin	Rivière	Rampe répartis	Rampe jointifs	PAB Jet de surface	Pas assez d'informations ou de visibilité	Rampe répartis	-	-	Pas assez d'informations ou de visibilité
5	2018	NCA - Moulin Pierrière	Rivière	Rivière	Rampe répartis ou jointifs	PAB Jet de surface	1er	PAB Jet de surface	Rampe répartis	-	Autres propositions
6	2014	NCA - Moulin Laurent	Rivière	Site trop complexe et données géoportail insuffisantes pour pouvoir proposer quelque chose en première approche.			Pas assez d'informations ou de visibilité	PAB Jet de surface	-	-	Pas assez d'informations ou de visibilité
7	2016	EUROVIA - Autoroute A89 Thiers	Jointifs	Si pas d'usages particuliers : effacement	Prébarrages		Autres propositions	PAP répartis	PAP jointifs	-	2e
8	2015	VNF - Thoraïse	Répartis	Prébarrages	PAB jet de surface	Rivière	Autres propositions	PAP répartis	PAB Jet de surface	-	1er
9	2015	NALDEO - Abbaye d'Acey	Répartis	Rivière	Pré-barrages + brosse à anguilles	Rampe répartis	3e	Rivière	-	-	Autres propositions
10	2016	IRH - Champagney	Répartis	Effacement	Rampe répartis	Rampes jointifs	2e	Prébarrages	-	-	Autres propositions
11	2018	ARTELIA - Goersdorf	Répartis / Jointifs	Micro-seuils	Prébarrages	PAB jet de surface	Autres propositions	Prébarrages	-	-	Autres propositions
12	2021	NCA - Musée de l'électrification	Prébarrages / Réparties	Micro-seuils	Rampe répartis ou jointifs		Pas assez d'informations ou de visibilité	PAP répartis	PAB Jet de surface	-	Pas assez d'informations ou de visibilité
13	2014	SMAGGA - Soucieu-en-Jarrest	Prébarrages / PAB	Si pas d'usages particuliers : effacement	Si pas d'usages particuliers : effacement	PAB jet de surface	Pas assez d'informations ou de visibilité	Prébarrages	-	-	Pas assez d'informations ou de visibilité

TRAVAUX DE FIN D'ETUDES

Outil d'aide à la décision multicritère axé sur la thématique des dispositifs de franchissement piscicole

14	2019	NCA - Moulin de Buze	Prébarrages	Effacement	Rampe répartis ou jointifs	micro-seuil	3e	Rampe répartis	Prébarrages	-	2e
15	2016	NCA - Moulin de Bas à Marquèze	Prébarrages	Rivière	Pré-barrages + brosse à anguilles	PAB jet de surface	2e	Prébarrages	PAB Jet de surface	-	1er
16	2019	NCA - Moulin-des-Rivailles	Prébarrages	Prébarrages	Micro-seuils	PAB jet de surface	1er	Rampe répartis	Prébarrages	-	2e
17	2019	ARTELIA - Barrage de Moncey	PAB	Effacement + aménagement du bras en amont	Rampe + aménagement du bras juste en amont	PAB jet surface	3e	PAB jet surface	-	-	1er
18	2015	JACQUEL et CHATILLON - Aulx les Cromary	PAB	Contournement pas l'ouvrage n°17	PAB jet surface		2e	PAB jet surface	-	-	1er
19	2015	DYNAMIQUE HYDRO - Barrage de Til-Châtel	PAB	Aménagement du bras droit pour remonter la ligne d'eau	Prébarrages	PAB jet surface	3e	Prébarrages	PAB jet surface	-	2e
20	2021	NCA - Moulin de la Roche à Gué	PAB	Rampe répartis	Prébarrages	PAB jet surface	3e	PAB jet surface	Rampe répartis	-	1er

Annexe 9 : Tableau récapitulatif des résultats de la méthode basée sur la comparaison des propositions entre FisPRO et l'avis des experts pour 20 cas sélectionnés

N°	Année	Source	FisPRO			E. Noisette				G. Pasquier			
			Proposition 1	Proposition 2	Proposition 3	Proposition 1	Proposition 2	Proposition 3	Remarques	Proposition 1	Proposition 2	Proposition 3	Remarques
1	2018	SINBIO - Moulin Gabet	PAB jet surface	Rivière		Aménager le bras gauche pour remonter la ligne d'eau	Rivière	PAB jet de surface	2	Rivière	Prébarrages	Rampe répartis	1
2	2018	ARTELIA - Goersdorf	PAB jet surface	Rivière		Rivière	PAB dans le moulin ?		1	Rivière	PAB Jet de surface	-	1
3	2015	NCA - Moulin Corbelière	Prébarrages	Rivière		Rivière	PAB jet de surface	Prébarrages	1	Rivière	Prébarrages	Rampe répartis	1
4	2015	NCA - Montreuil-Bonnin	Prébarrages	Rivière		Rampe répartis	Rampe jointifs	PAB Jet de surface	Pas assez d'informations ou de visibilité	Rampe répartis	-	-	Pas assez d'informations ou de visibilité
5	2018	NCA - Moulin Pierrière	Prébarrages	Rivière		Rivière	Rampe répartis ou jointifs	PAB Jet de surface	1	PAB Jet de surface	Rampe répartis	-	Autres propositions
6	2014	NCA - Moulin Laurent	Prébarrages	Rivière		Site trop complexe et données géoportail insuffisantes pour pouvoir proposer qqc en première approche.			Pas assez d'informations ou de visibilité	PAB Jet de surface	Pas assez d'informations ou de visibilité (hasard)	-	Pas assez d'informations ou de visibilité
7	2016	EUROVIA - Autoroute A89 Thiers	Prébarrages	PAP répartis	PAP jointifs	Si pas d'usages particuliers : effacement	Prébarrages		2	PAP répartis	PAP jointifs	-	1
8	2015	VNF - Thoraise	Prébarrages	PAB jet surface	PAP répartis	Prébarrages	PAB jet de surface	Rivière	1	PAP répartis	PAB Jet de surface	-	1
9	2015	NALDEO - Abbaye d'Acey	Prébarrages	PAP répartis	PAP jointifs	Rivière	Pré-barrages + brosse à anguilles	Rampe répartis	2	Rivière	-	-	Autres propositions
10	2016	IRH - Champagney	Prébarrages	PAP répartis	PAP jointifs	Effacement	Rampe répartis	Rampes jointifs	2	Prébarrages	-	-	1
11	2018	ARTELIA - Goersdorf	Prébarrages	Rivière		Micro-seuils	Prébarrages	PAB jet de surface	1	Prébarrages	-	-	1
12	2021	NCA - Musée de l'électrification	Prébarrages	PAP répartis		Micro-seuils	Rampe répartis ou jointifs		Pas assez d'informations ou de visibilité	PAP répartis	PAB Jet de surface	-	Pas assez d'informations ou de visibilité

TRAVAUX DE FIN D'ETUDES

Outil d'aide à la décision multicritère axé sur la thématique des dispositifs de franchissement piscicole

13	2014	SMAGGA - Soucieu-en-Jarrest	PAB jet surface	Prébarrages		Si pas d'usages particuliers : effacement	Si pas d'usages particuliers : effacement	PAB jet de surface	Pas assez d'informations ou de visibilité	Prébarrages	-	-	Pas assez d'informations ou de visibilité
14	2019	NCA - Moulin de Buze	Prébarrages	PAP répartis	PAP jointifs	Effacement	Rampe répartis ou jointifs	micro-seuil	2	Rampe répartis	Prébarrages	-	1
15	2016	NCA - Moulin de Bas à Marquèze	Prébarrages	PAP répartis	PAP jointifs	Rivière	Pré-barrages + brosse à anguilles	PAB jet de surface	2	Prébarrages	PAB Jet de surface	-	1
16	2019	NCA - Moulins-des-Rivailles	Prébarrages	PAP répartis	PAP jointifs	Prébarrages	Micro-seuils	PAB jet de surface	1	Rampe répartis	Prébarrages	-	1
17	2019	ARTELIA - Barrage de Moncey	PAB jet surface	Prébarrages	PAP répartis	Effacement + aménagement du bras en amont	Rampe + aménagement du bras juste en amont	PAB jet surface	2	PAB jet surface	-	-	1
18	2015	JACQUEL et CHATILLON - Aulx les Cromary	PAB jet surface			Contournement pas l'ouvrage n°17	PAB jet surface		2	PAB jet surface	-	-	1
19	2015	DYNAMIQUE HYDRO - Barrage de Til-Châtel	PAB jet surface			Aménagement du bras droit pour remonter la ligne d'eau	Prébarrages	PAB jet surface	3	Prébarrages	PAB jet surface	-	2
20	2021	NCA - Moulin de la Roche à Gué	Prébarrages	PAP répartis	PAP jointifs	Rampe répartis	Prébarrages	PAB jet surface	1	PAB jet surface	Rampe répartis	-	2

Annexe 10 : Tableau récapitulatif des résultats de l'estimation des coûts réalisé avec l'outil ECOGEA sur 10 cas d'études

Ouvrage de franchissement	Année	Source	Q cours d'eau médian	Q passe	Pente	Hauteur chute	Largeur réelle de la passe	Longueur réelle de la passe	Coût travaux (H.T.)	Coût calculé outil ECOGEA		
			m ³ /s	m ³ /s	%	m	m	m	K€	Minimum	Moyen	Maximum
										K€	K€	K€
Rivière de contournement	2018	SINBIO - Moulin Gabet	49,6	5	0,82	1,5	6,8	180	335	334	569	764
	2018	ARTELIA - Goersdorf	1,9	0,3	1	2,82	3	310	228	131	269	391
Enrochement régulièrement réparties	2015	VNF - Barrage de Thoraise	52,6	0,9 à 3	4	1,6	6	44	220	111	254	479
	2016	IRH - Champagny	0,19	0,028	5	0,75	3,5	15	95	23	56	98
Enrochement périodique ou pré-barrages	2021	NCA - Musée de l'électrification	0,3	0,049 à 0,5	5	1,05	3,5	20	43	20	69	137
	2016	NCA - Moulin de Bas à Marquèze	0,38	0,16	10	1,2	10	12	102	25	73	117
Bassins à échancrures profondes	2014	NCA - Moulin Laurent	0,08	0,075	8,7	1,61	1,5	18,5	40	31	108	157
	2019	ARTELIA - Barrage de Moncey	13,8	1	4,7	2,1	3	45	160	97	185	281
	2015	DYNAMIQUE HYDRO - Barrage de Til-Châtel	4	0,8	11	2,45	2	23,1	108	64	164	256
	2015	VNF - Barrage de Thoraise	52,6	1	6	1,6	3,5	28	199	122	268	466

Annexe 11 : Fiche procédure

Cette annexe est une fiche procédure détaillant les différentes étapes à suivre afin d'utiliser l'outil guidant le choix sur le type d'ouvrage de franchissement à implanter sur un site d'étude en fonction de paramètres intrinsèques.

Traitement de la donnée sur EXCEL :

La première partie de la fiche procédure permet de traduire de façon automatique les différentes données obtenues sur le site d'étude en valeurs modifiées insérables directement sur le logiciel FisPRO.

Prérequis avant d'utiliser la feuille EXCEL :

Afin que la feuille EXCEL soit fonctionnelle, il est indispensable d'activer l'outil « SOLVEUR » dans Microsoft Visual Basic Application (VBA). Pour ce faire, exécuter la manipulation suivante :

- Onglet « Développeur » sur EXCEL → « Visualiser le code » dans le sous-onglet Contrôles → « Outils », « Références » et cocher « Solveur » sur VBA.

Si l'onglet « Développeur » n'est pas disponible dans la barre des tâches EXCEL alors effectuer la manipulation suivante :

- « Fichier » → « Option » → « Personnaliser le ruban » → « Développeur ».

Si l'outil Solveur n'est pas disponible dans l'onglet Données sur EXCEL, effectuer la manipulation suivante :

- « Fichier » → « Option » → « Compléments » → « Compléments EXCEL » puis cliquer sur « Atteindre... » → Cocher « Complément Solveur » puis cliquer sur OK

Présentation de la feuille EXCEL

La feuille EXCEL est composée de quatre parties :

- Une partie « Données critères », dans laquelle l'utilisateur va renseigner les informations piscicoles, topographiques et hydraulique du site ;
- Une partie « Résultats critères » qui donne à l'utilisateur les valeurs des critères à introduire sur le logiciel FisPro ;
- Une partie « Estimation du coût du projet : étude, travaux, entretien » qui détermine le coût minimum, moyen et maximum associé à chaque ouvrage de franchissement. Le coût présenté correspond à la somme des coûts d'étude, de travaux et d'entretien ;
- Une légende caractérisant à l'aide d'un dégradé de couleurs les différentes cases à renseigner ou à calculer.

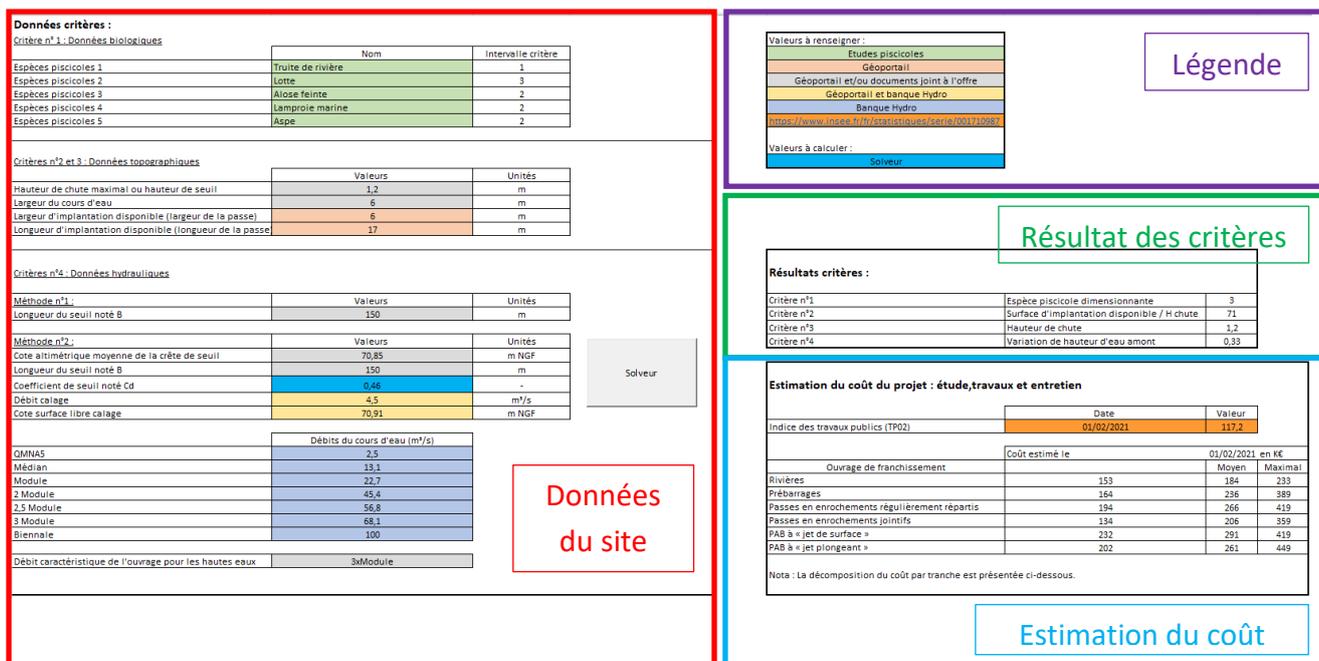


Figure 59 : Présentation de la feuille EXCEL

Partie 1 : Données critères

Critère n°1 : Données biologique

Les données biologiques permettent d'obtenir la valeur du critère n°1. Les données sont obtenues grâce à une étude préalable des espèces piscicoles bio-indicatrices présentes sur le site à aménager. L'utilisateur peut avoir accès à cette information grâce au CCTP ou aux documents annexes de l'offre émis par le maître d'ouvrage. Si l'étude ne détaille pas les espèces cibles, il est possible d'avoir un complément d'information dans les Documents techniques d'accompagnement des classements pour le bassin... du SDAGE (ex : Loire Bretagne ou Seine Normandie) ou sur la plateforme NAIADES EAU France (Code Sandre : 4) qui permet d'accéder aux relevés d'observation sur la qualité des cours d'eau et des plans d'eau. La procédure sur NAIADES est la suivante :

« Accès aux données » → « Recherche » → Renseigner ensuite la zone administrative ou le cours d'eau et dans l'onglet « Support » ajouter « 4 – Poissons » puis lancer la recherche.

Les espèces piscicoles « dimensionnantes » sont ensuite à préciser dans la feuille EXCEL grâce au menu déroulant (voir capture d'écran ci-dessous).

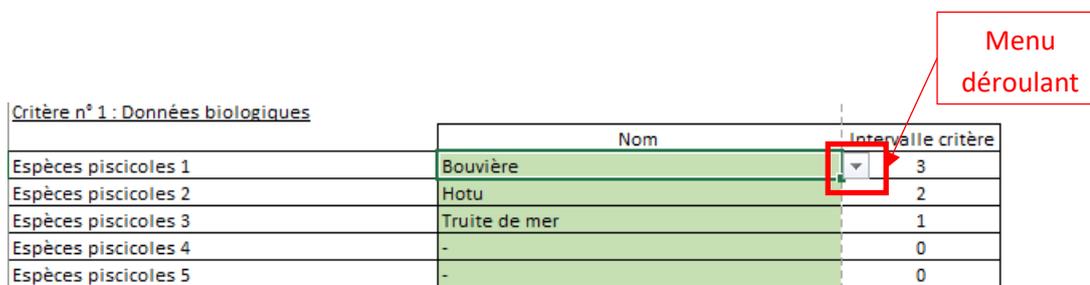


Figure 60 : Présentation du support des données pour le critère n°1 sur EXCEL

Important : S'il y a moins de cinq espèces piscicoles ciblées par l'étude, il est nécessaire de remplir la ligne par un « - ». S'il y en a plus que cinq, alors intervertir les espèces et observer si les résultats diffèrent. La valeur 3 est l'« intervalle critère » le plus contraignant.

Critère n°2 et 3 : Données topographiques

Les données topographiques permettent d'obtenir les valeurs des critères 2 et 3. Les données nécessaires afin de calculer ces critères sont :

- La hauteur de chute maximale ou hauteur de seuil : cette donnée est, dans le meilleur des cas, renseigné dans le CCTP ou dans les documents joint à l'offre. Cela signifie que des mesures ou des études hydrauliques antérieures ont été réalisées. Si aucune information n'est disponible à ce propos dans l'offre, il est possible d'utiliser la plateforme Géoportail. Néanmoins, l'utilisation de Géoportail pour déterminer cette valeur est bien moins précise.

Utilisation de Géoportail pour déterminer la hauteur de chute au droit d'un ouvrage :

Après avoir trouvé l'emplacement du site d'étude sur Géoportail, utiliser l'outil « Établir un profil altimétrique », puis tracer le profil altimétrique en long du cours d'eau entre l'amont de l'ouvrage et l'aval. La différence entre le niveau d'eau amont et le niveau d'eau aval donne alors la hauteur de chute. La photographie aérienne ayant été prise à un instant t, la hauteur de chute mesurée est donc valable pour une unique situation hydrologique. Elle peut ainsi ne pas être la hauteur de chute maximale observable.



Figure 61 : Exemple de mesure de la hauteur de chute sur Géoportail (Archive NCA 2017 - Sarthe)

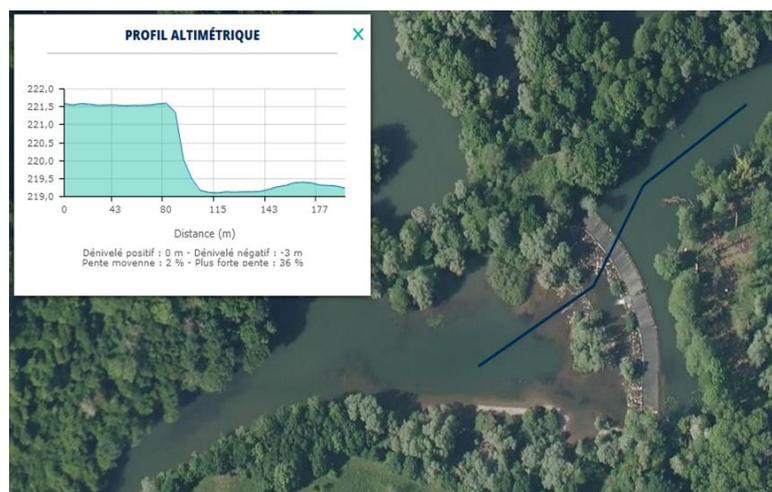


Figure 62 : Exemple de mesure de la hauteur de chute sur Géoportail (Barrage de Moncey – Doubs)

- Largeur amont du cours d'eau : donnée obtenue à l'aide des documents joints dans l'offre ou à grâce à Géoportail (les écarts entre les deux valeurs sont moins importants) ;
- Largeur d'implantation disponible : donnée obtenue grâce à Géoportail ;
- Longueur d'implantation disponible : donnée obtenue grâce à Géoportail.



Figure 63 : Photographie aérienne du seuil à Busserais sur la Gartempe (cas modélisé durant mon TFE)

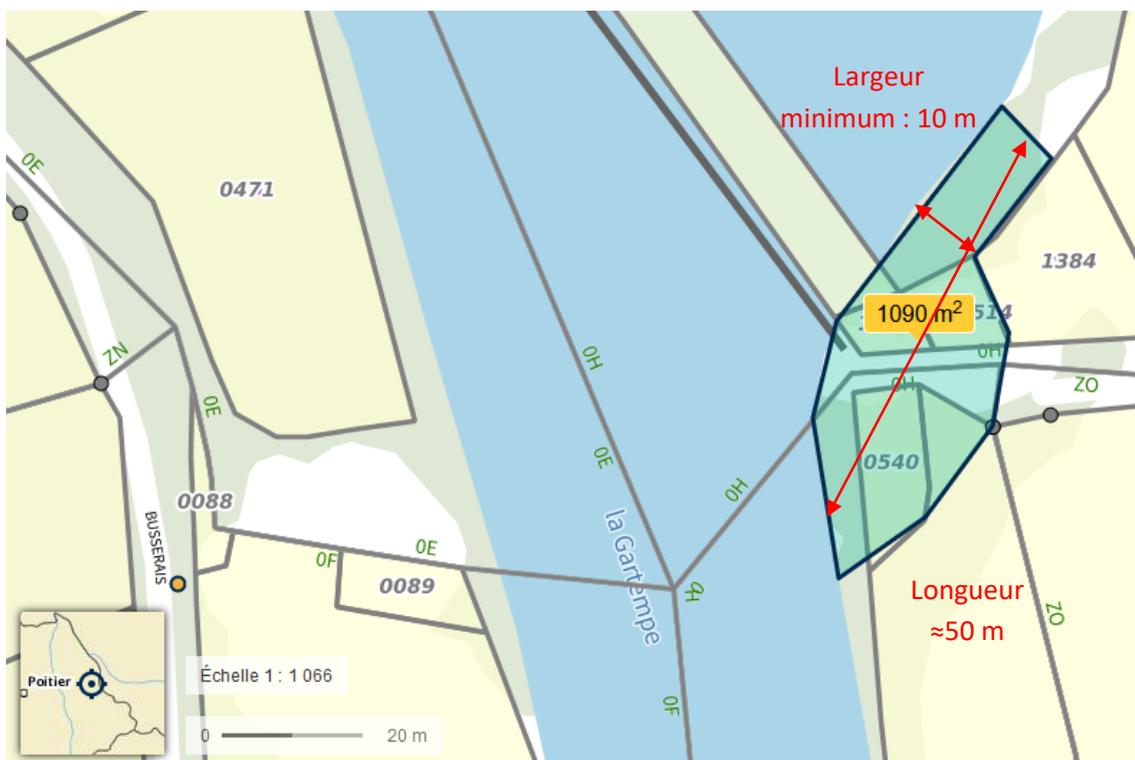


Figure 64 : Exemple de mesure de l'emprise disponible sur Géoportail (Gartempe à Busserais)

Les différentes valeurs sont ensuite précisées dans la feuille EXCEL (voir capture d'écran ci-dessous).

Critères n°2 et 3 : Données topographiques

	Valeurs	Unités
Hauteur de chute maximal ou hauteur de seuil	1,2	m
Largeur amont du cours d'eau	6	m
Largeur d'implantation disponible	6	m
Longueur d'implantation disponible	17	m

Figure 65 : Présentation du support des données pour le critère n°2 et 3 sur EXCEL

Critère n°4 : Données hydrauliques

Le critère n°4 permet de déterminer la variation de hauteur d'eau amont entre le débit dimensionnant à l'étiage (1/10^e module ou QMNA5) et le débit de dimensionnement de l'ouvrage de franchissement pour les hautes eaux (double ou triple module).

La feuille EXCEL prévoit deux méthodes pour déterminer la valeur de la variation, qui dépend des données disponibles :

- Méthode 1 : La première méthode permet d'obtenir la variation de hauteur d'eau grâce à une loi seuil. Celle-ci est peu précise mais nécessite peu de données. Le coefficient de seuil noté Cd est fixé à 0,42 ;
- Méthode 2 : La deuxième méthode permet également d'obtenir la variation de hauteur d'eau en utilisant une loi de seuil mais celle-ci est plus précise étant donné qu'elle intègre le calage du coefficient de loi de seuil noté Cd.

Méthode 1 :

Les données nécessaires afin de calculer le critère n°4, avec la méthode simplifiée, sont :

- La longueur du seuil : donnée obtenue à l'aide des documents joints dans l'offre ou grâce à Géoportail (les écarts entre les deux valeurs sont négligeables étant donné que les déversoirs sont souvent anciens et que Géoportail a intégré ces données) ;
- Le coefficient de seuil noté Cd, égal à **0,42** [Hydraulique à Surface Libre – J. VASQUEZ 2016] ;
- Les débits caractéristiques du cours d'eau (QMNA5, Médian, Module et Biennale) : données obtenues grâce à la plateforme Banque Hydro qui répertorie les données hydrologiques en France. Si le site d'étude est éloigné de la station de mesure, les données hydrauliques doivent être corrigées grâce au fichier EXCEL basé sur la formule de Myer. S'il n'y a pas de station à proximité, il faut alors utiliser la station d'un bassin géographiquement proche ;
- Le débit caractéristique du dimensionnement de l'ouvrage pour les hautes eaux doit être renseigné grâce au menu déroulant : données obtenues grâce aux documents joints à l'offre (souvent 2,5 ou 3 fois le module).

Nota : La loi de seuil se base sur l'hypothèse que la crête du seuil est rectiligne horizontale. Cela induit que la lame déversante est constante sur toute la longueur de la crête du seuil.

Méthode 2 :

Les données nécessaires afin de calculer le critère n°4, avec la méthode étoffée, sont :

- La cote altimétrique moyenne de la crête du seuil : donnée obtenue à l'aide des documents joints dans l'offre par le maître d'ouvrage. La valeur de la cote de la crête du seuil est moyennée, cela induit que les variations du niveau d'eau amont seront altérées (voir annexe 2) ;
- La longueur du seuil : donnée obtenue à l'aide des documents joints dans l'offre ou grâce à Géoportail (les écarts entre les deux valeurs sont négligeables étant donné que les déversoirs sont souvent anciens et que Géoportail a intégré ces données).

Afin d'améliorer la précision du calcul théorique de la variation de hauteur d'eau amont, il est possible de caler le coefficient de seuil grâce à un couple de débits et de hauteur d'eau connus.

- Le débit de calage : donnée obtenue grâce aux fonctionnalités de Géoportail et de la Banque Hydro.

Géoportail dispose d'une carte permettant de déterminer la date de prise de vue de la dernière photographie satellite. Il est possible de la retrouver en écrivant « Graphe mosaïque photographie aérienne (BDORTHO) » dans la barre de recherche de Géoportail.

Le lien ci-dessous permet également d'avoir accès à la couche :

[https://www.geoportail.gouv.fr/carte?c=2.471871119626046,48.84651140963501&z=20&l0=ORTH OIMAGERY.ORTHOPHOTOS::GEOPORTAIL:OGC:WMTS\(1\)&l1=ORTHOIMAGERY.ORTHOPHOTOS.GRA PHE-MOSAIQUAGE::GEOPORTAIL:OGC:WMS\(1\)&permalink=yes](https://www.geoportail.gouv.fr/carte?c=2.471871119626046,48.84651140963501&z=20&l0=ORTH OIMAGERY.ORTHOPHOTOS::GEOPORTAIL:OGC:WMTS(1)&l1=ORTHOIMAGERY.ORTHOPHOTOS.GRA PHE-MOSAIQUAGE::GEOPORTAIL:OGC:WMS(1)&permalink=yes)



Figure 66 : Photographie aérienne avec date de prise de vue (Gartempe à Busserais 86)

Grâce à la Banque Hydro, il est possible d'estimer le débit au niveau de la station de mesure à proximité du site d'étude à la même date que la prise de vues. Procédure : QTFIX ou QTVAR.

Nota : Si la station de mesure est éloignée du site d'étude, il est judicieux d'étendre la procédure sur plusieurs jours afin d'estimer les variations du débit (temps de séjour, propagation de l'onde).

QTVAR : débits à pas de temps variable
 Période du 11/10/2017 00:00 au 11/10/2017 23:59
 Précision du calcul : 5%

La Gartempe à Montmorillon

Code station : L5411810 Producteur : SPC VCA - Centre de Poitiers
 Bassin versant : 1866 km² E-mail : dhvca.dreal-na@developpement-durable.gouv.fr

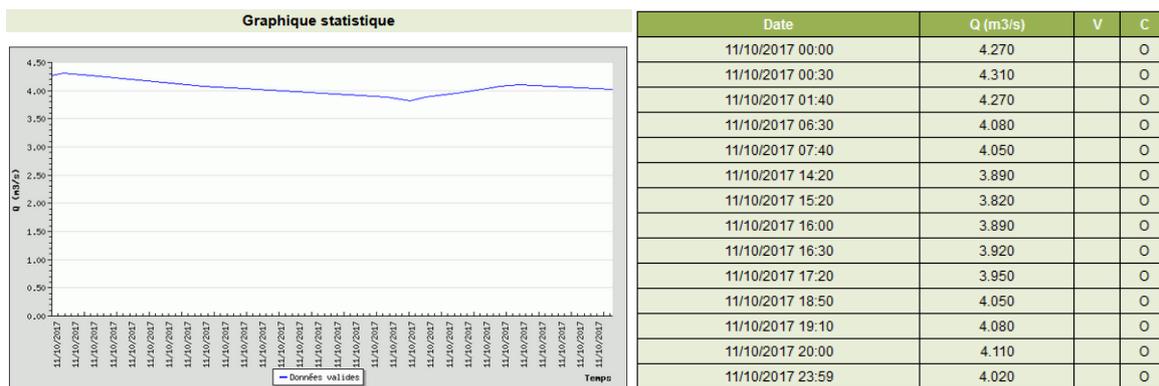


Figure 67 : Extrait de la Banque Hydro (QTVAR)

Le débit obtenu à partir de la Banque Hydro est ensuite corrigé à l'aide de la feuille EXCEL basé sur la formule de Myer afin de prendre en compte les variations de la surface du bassin versant et l'impact sur le débit.

Équation 4 : Formule de Myer

$$Q_{BV2} = Q_{BV1} \times \left(\frac{S_{BV2}}{S_{BV1}} \right)^\alpha$$

- La cote de la surface libre de calage : donnée obtenue grâce à Géoportail (même méthode que pour obtenir la variation de hauteur d'eau, voir critère n°2 et3) ;
- Les débits caractéristiques du cours d'eau (QMNA5, Médian, Module et Biennale) : données obtenues grâce à la plateforme Banque Hydro qui répertorie les données hydrologiques en France. Si le site d'étude est éloigné de la station de mesure, les données hydrauliques doivent être corrigées grâce au fichier EXCEL basé sur la formule de Myer ;
- Le débit caractéristique du dimensionnement de l'ouvrage pour les hautes eaux doit être renseigné grâce au menu déroulant : données obtenue grâce aux documents joints à l'offre (souvent 2,5 ou 3 fois le module).

Nota : Loi de seuil se base sur l'hypothèse que la crête du seuil est rectiligne horizontale. Cela induit que la lame déversante est constante sur toute la longueur de la crête du seuil.

La figure ci-dessous présente l'interface de la feuille EXCEL associée au calcul du critère n°4.

Critères n°4 : Données hydrauliques

Méthode n°1 :	Valeurs	Unités
Longueur du seuil noté B	150	m

Méthode n°2 :	Valeurs	Unités
Cote altimétrique moyenne de la crête de seuil	70,85	m NGF
Longueur du seuil noté B	150	m
Coefficient de seuil noté Cd	0,46	-
Débit calage	4,5	m ³ /s
Cote surface libre calage	70,91	m NGF

Débits du cours d'eau (m ³ /s)	
QMNA5	2,5
Médian	13,1
Module	22,7
2 Module	45,4
2,5 Module	56,8
3 Module	68,1
Biennale	100

Débit caractéristique de l'ouvrage pour les hautes eaux	3xModule
---	----------

Solveur

Menu déroulant

Figure 68 : Présentation du support des données pour le critère n°4 sur EXCEL

Partie 2 : Résultats critères

Les résultats obtenus à partir de la première partie sont récapitulés dans le tableau intitulé « Résultats critères » et peuvent directement être intégrés dans le logiciel FisPRO.

Résultats critères :		
Critère n°1	Espèce piscicole dimensionnante	3
Critère n°2	Surface d'implantation disponible / H chute	71
Critère n°3	Hauteur de chute	1,2
Critère n°4	Variation de hauteur d'eau amont	0,33

Figure 69 : Présentation du tableau récapitulatif des résultats des critères

Partie 3 : Estimation du coût du projet : étude, travaux et entretien

Grace aux données renseignées sur la feuille EXCEL pour déterminer la valeur des critères, les différents coûts de projet sont calculés. Les coûts prennent en compte l'évolution du coût des travaux grâce à l'indice des travaux publics (TP02).

Estimation du coût du projet : étude, travaux et entretien			
	Date	Valeur	
Indice des travaux publics (TP02)	01/02/2021	117,2	
	Coût estimé le 01/02/2021 en K€		
Ouvrage de franchissement		Moyen	Maximal
Rivières	153	184	233
Prébarrages	164	236	389
Passes en enrochements régulièrement répartis	194	266	419
Passes en enrochements jointifs	134	206	359
PAB à « jet de surface »	232	291	419
PAB à « jet plongeant »	202	261	449

Nota : La décomposition du coût par tranche est présentée ci-dessous.

Figure 70 : Présentation de l'outil d'estimation du coût du projet

Utilisation de FisPRO

La deuxième partie de la fiche procédure permet, en utilisant les résultats de la feuille EXCEL, de déterminer le type de passes pouvant être implanté sur le site d'étude. Le logiciel FisPRO est basé sur le principe de logique floue, c'est-à-dire qu'il permet de prendre en compte les incertitudes sur les critères, et qu'il utilise les systèmes d'inférence floue pour déterminer un résultat.

Un complément d'information est disponible dans la partie VI « Logiciel FisPRO » du rapport.

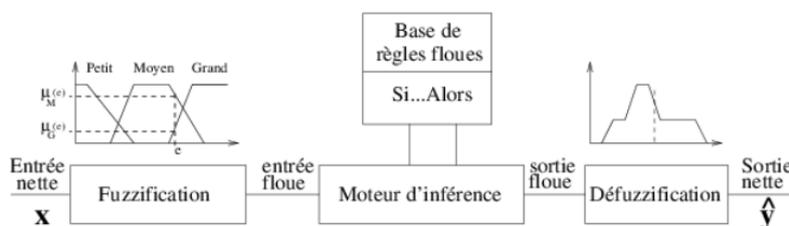


Figure 71 : Schéma d'un système d'inférence floue (SIF)

Dans un premier temps ouvrir, le fichier « PAP_4_CRITERES.REGLES.fis ». L'interface présente une barre des tâches, une zone définissant les critères d'entrée (variables), une zone définissant les critères de sortie (résultats) et un bouton « Règles ».

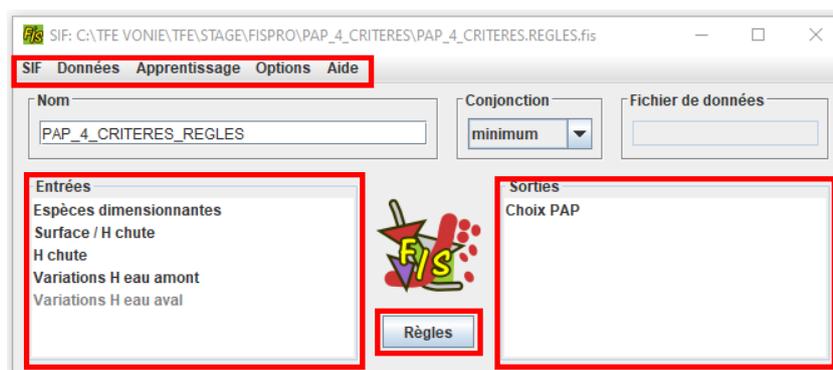


Figure 72 : Présentation de l'interface du logiciel FisPRO

L'interface est fonctionnelle, il suffit de démarrer le modèle. Pour ce faire : « SIF » → « Inferer »
 Ensuite, il faut insérer les valeurs des résultats de chaque critère dans les zones correspondantes sur FisPRO. Les six triangles de la colonne de droite correspondent aux différentes passes.

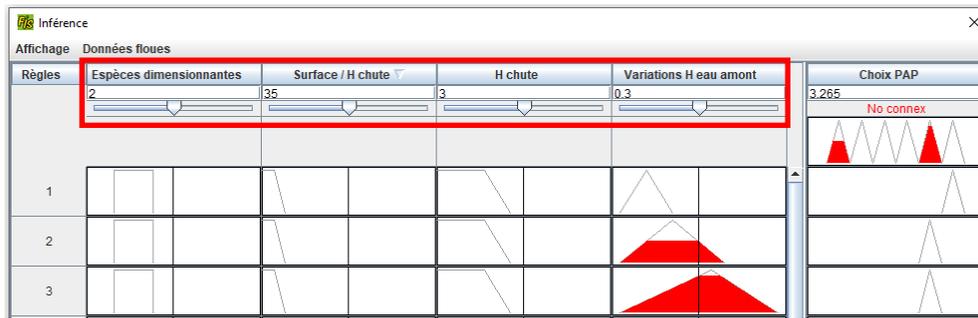


Figure 73 : Moteur d'inférence

Chaque triangle correspond à une passe. Pour avoir accès à l'interface associant chaque triangle à chaque passe double clic sur la sortie « Choix PAP » (voir la figure ci-dessous).

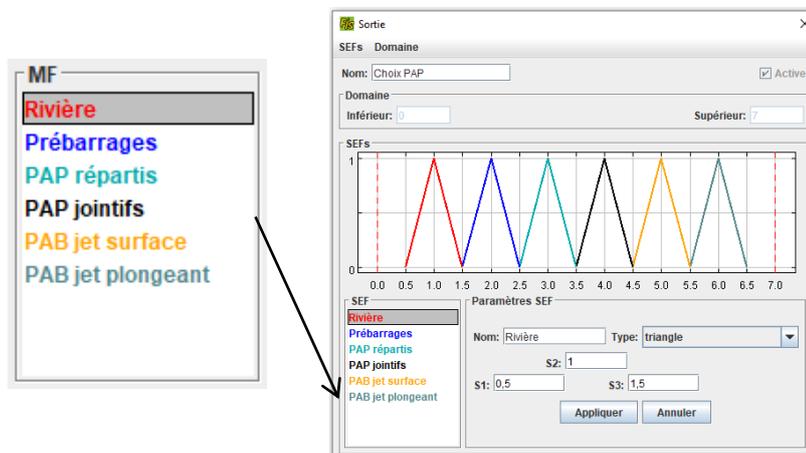


Figure 74 : Correspondance entre fonctions mathématiques et ouvrages de franchissement

Exemple de cas d'étude :

Dans le cas ci-dessous les passes correspondant aux triangles 2 et 3 sont à privilégier. Le triangle 2 correspond aux pré-barrages tandis que le triangle 3 correspond à la passe en enrochements régulièrement répartis. Le pourcentage de remplissage associé à chaque triangle détermine la passe la plus adaptée.

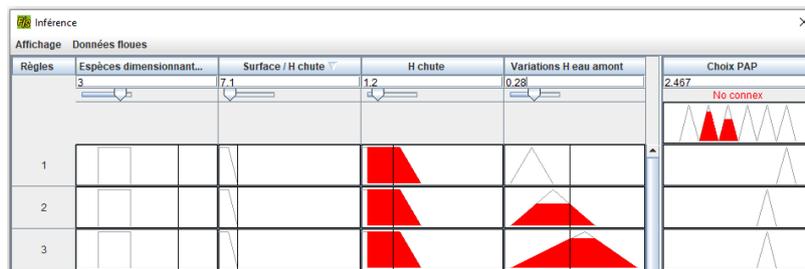


Figure 75 : Exemple de cas concret

Les critères, « Espèces dimensionnantes, Surface / H chute ou H chute » sont peu soumis aux incertitudes de calcul alors que le critère « Variations H eau amont » est construit à partir de nombreuses hypothèses. Il est donc conseillé de faire varier ce critère manuellement afin d'observer les incidences sur le résultat. Par exemple, si le critère n°4 à une valeur de 0,5 m alors le triangle 3 est exclu et il ne reste que le triangle 2 correspondant à la passe en enrochements régulièrement répartis (voir figure ci-dessus).

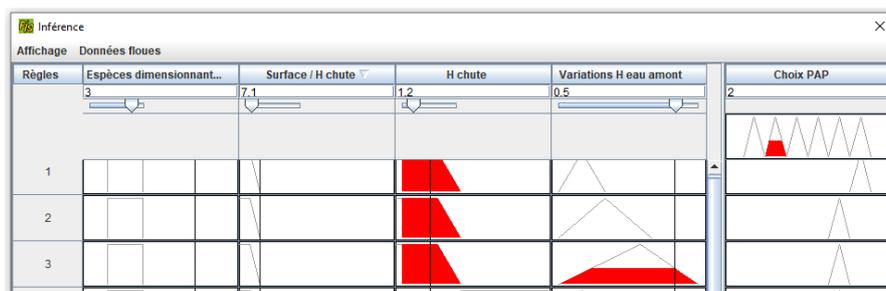


Figure 76 : Exemple de cas concret

Commande FisPRO

Cette partie permet une prise en main du logiciel FisPRO. La logique floue et les systèmes d'inférence floue ne sont pas détaillés dans cette partie mais sont présentés dans le rapport du mémoire en partie VI.

Créer une entrée

Les entrées correspondent aux critères ou aux variables qui définissent le projet (Exemple : Température, Pluviométrie, Potentiel du sol, etc...). Pour créer une entrée : clic droit dans la zone « Entrées » dans l'interface d'ouverture → « Nouvelle entrée » → « SEFs » → « Nouvelle SEF » → « Appliquer »

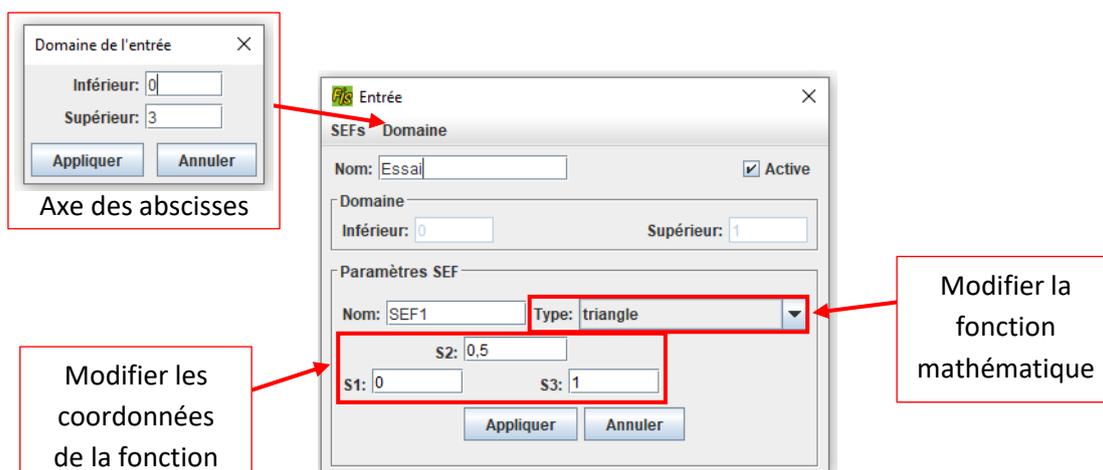


Figure 77 : Présentation de l'interface permettant de créer une entrée

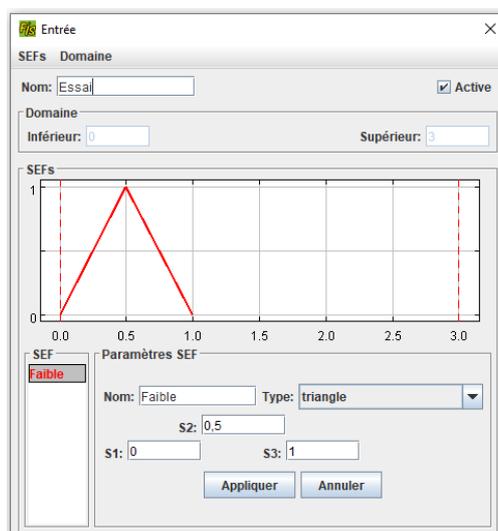


Figure 78 : Résultat après la création du critère « essai » en entrée

Pour ajouter un sous ensemble flou d'entrée sur le même critère, faire : « SEFs » → « Nouveau SEF »

Créer une sortie

La ou les sorties correspondent aux problématiques du projet (Ex : Rendement). Pour créer une sortie faire clic droit dans la zone « Sorties » dans l'interface d'ouverture → « Nouvelle sortie » → « Floue » → « SEFs » → « Nouvelle SEF » → « Appliquer »

Pour ajouter un autre paramètre de sortie sur le même critère : « SEFs » → « Nouveau SEF »

Générer des règles

Les règles floues permettent de « caler le modèle » de l'étude (voir partie VI pour un complément d'informations). Lorsque les différents critères d'entrées et sorties sont créés, effectuer la manipulation suivante afin de générer automatiquement toutes les combinaisons : cliquer sur « SIF » dans le menu principal → « Générer les règles » → Un nouveau fichier est créé. Cliquer sur « Règles » dans le nouveau fichier.

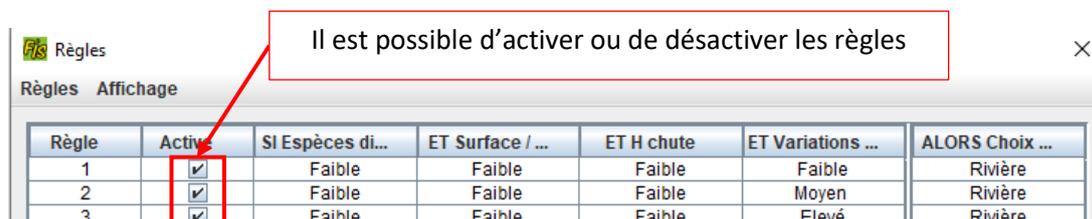


Figure 79 : Règles FisPRO

Si l'utilisateur n'a pas besoin de générer toutes les combinaisons de règles, il peut les créer lui-même à partir du fichier initial en cliquant sur « Règles ».

Inférer

Inférer le modèle permet d'obtenir les résultats du « calage » et d'effectuer les simulations (voir partie VI). Lorsque les différentes règles sont créées, effectuer la manipulation suivante : cliquer sur « SIF » dans le menu principal → « Inférer »

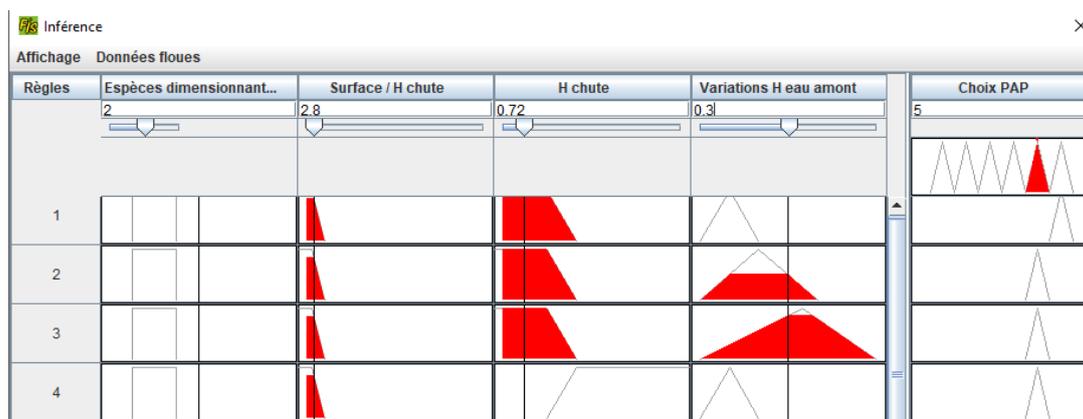


Figure 80 : Résultat de l'inférence des règles floues