



Informations sur la Continuité Ecologique - ICE

Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons

Principes et méthodes

Jean-Marc BAUDOIN, Vincent BURGUN,
Matthieu CHANSEAU, Michel LARINIER,
Michaël OVIDIO, William SREMSKI,
Pierre STEINBACH, Bruno VOEGTLE

L' office national de l'eau et des milieux aquatiques

Créé en avril 2007 par la loi sur l'eau du 30 décembre 2006, l'Onema est un établissement public sous tutelle du ministère en charge de l'Ecologie.

Organisme technique français de référence sur la connaissance et la surveillance de l'état des eaux et sur le fonctionnement des milieux aquatiques, sa finalité est de favoriser la gestion globale et durable de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques.

Il contribue ainsi à la reconquête de la qualité des eaux et l'atteinte de leur bon état, objectif fixé par la directive cadre européenne sur l'eau.

Les 900 agents de l'Onema sont présents sur l'ensemble du territoire métropolitain et dans les départements et collectivités d'outre mer au titre de la solidarité de bassin.

Pour mener à bien ses missions, l'Onema travaille en étroite collaboration et en complémentarité avec l'ensemble des acteurs de l'eau.

Cet ouvrage poursuit la collection “ *Comprendre pour agir* ” qui accueille des ouvrages issus de travaux de recherche et d'expertise mis à la disposition des enseignants, formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs et des gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques.

Il est consultable sur le site internet de l'Onema (www.onema.fr, rubrique publications) ainsi que sur le portail national “ les documents techniques sur l'eau “ (<http://www.documentation.eaufrance.fr/>).

Informations sur la Continuité Ecologique - ICE

Evaluer le
franchissement des obstacles
par les poissons

Principes et méthodes



Jean-Marc BAUDOIN, Vincent BURGUN,
Matthieu CHANSEAU, Michel LARINIER,
Michaël OVIDIO, William SREMSKI,
Pierre STEINBACH, Bruno VOEGTLE

Préface



René Lalement

Directeur de la connaissance
et de l'information sur l'eau
Onema

Philippe Dupont

Directeur de l'action scientifique et technique
Onema



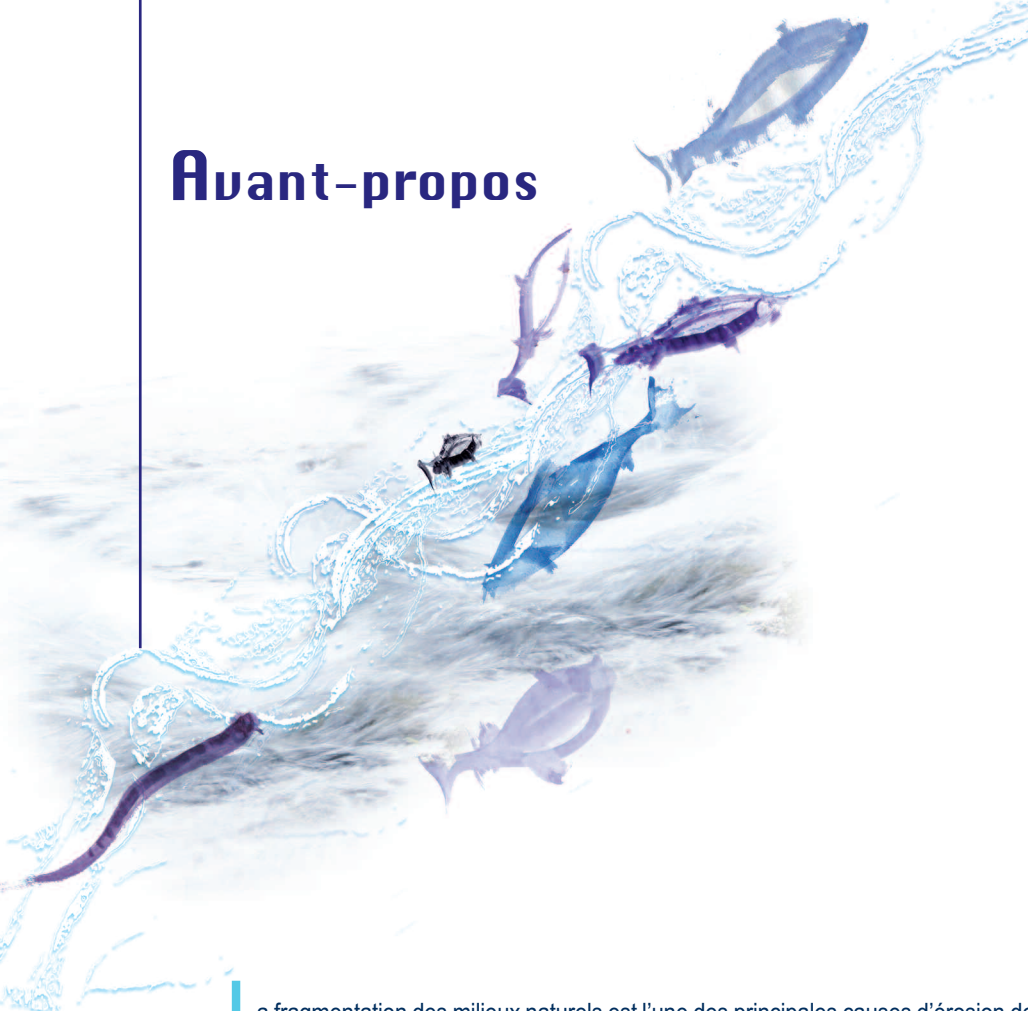
La fragmentation des habitats est reconnue depuis une trentaine d'années comme l'un des cinq facteurs majeurs d'érosion de la biodiversité, aux côtés de la pollution, de la surexploitation des ressources naturelles, des espèces invasives et du changement climatique.

Depuis, les politiques publiques de l'environnement ont fait de la restauration de la connectivité des habitats naturels l'un de leurs objectifs. C'est le cas en particulier de la politique de l'eau, qui a placé la continuité écologique des cours d'eau au cœur des outils de planification, en en faisant un élément de qualité suivi par les programmes de surveillance et une orientation fondamentale des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux. C'est donc le temps des choix et aussi des controverses, tant la mise en cause des discontinuités existantes touche à notre perception du paysage et aux différents usages des milieux aquatiques. Avec, en moyenne, au moins un obstacle tous les cinq kilomètres le long des cours d'eau métropolitains, c'est l'ensemble du territoire, de ses gestionnaires et de ses usagers qui est concerné. Il était donc nécessaire de disposer de méthodes communes et standardisées pour justifier le choix des actions sur la base de données objectives et comparables. Pour la continuité piscicole, on dispose désormais de la méthode " ICE ", présentée dans cet ouvrage, qui décrit les obstacles sur les cours d'eau et évalue leur franchissement en montaison par les poissons.

La conception de cette méthode, sa mise au point et son déploiement à l'échelle nationale auront demandé cinq ans d'efforts collectifs, menés par des experts scientifiques et par les services territoriaux de l'Onema. Elle est l'illustration d'une approche pluridisciplinaire exemplaire entre hydraulique et écologie, deux disciplines que certains pourraient vouloir opposer mais qu'il faut au contraire faire travailler en synergie au profit de la restauration des milieux.

La publication de cet ouvrage dans la collection *Comprendre pour agir* marque le passage de relais entre l'équipe qui a porté cette méthode et celles et ceux qui s'en empareront, pour une meilleure appréhension de la continuité de nos cours d'eau et pour en faire l'un des outils opérationnels des politiques de l'eau et de la biodiversité.

Avant-propos



La fragmentation des milieux naturels est l'une des principales causes d'érosion de la biodiversité. L'impact des obstacles à l'écoulement se manifeste par une dégradation des milieux aquatiques et consécutivement des biocénoses et des processus écologiques qu'ils abritent.

Face aux exigences réglementaires (directive cadre sur l'eau, loi sur l'eau et les milieux aquatiques, grenelle de l'environnement, règlement européen de sauvegarde de l'anguille...) et à l'ensemble des enjeux environnementaux de la restauration de la continuité écologique des milieux aquatiques, l'Onema a souhaité développer un "outil" permettant de diagnostiquer et quantifier les éventuels impacts des ouvrages hydrauliques sur la libre circulation de l'ichtyofaune.

Le protocole ICE est une méthodologie nationale de production d'"Informations sur la Continuité Ecologique" à destination des acteurs de l'environnement et de l'aménagement du territoire, des scientifiques, des enseignants, bureaux d'études et tout public intéressé.

Il s'appuie sur une importante synthèse des connaissances scientifiques internationales actuelles et sur les productions scientifiques et techniques d'un groupe de travail composé d'experts français (Onema et Ecogea) et belge (Université de Liège).

L'objectif de ce document est de présenter les enjeux de la continuité piscicole, les principes scientifiques qui ont prévalu à la construction de cette méthodologie d'évaluation, ainsi que le protocole standardisé qui a été développé. Il permet de diagnostiquer de manière simple et objective le risque d'entrave au déplacement de l'ichtyofaune en montaison, généré par les principaux types d'obstacles physiques à l'écoulement et pour les espèces communes des cours d'eau de France métropolitaine. Ce diagnostic repose sur la confrontation des caractéristiques typologiques, géométriques et hydrauliques des obstacles avec les capacités physiques de déplacement des espèces de poissons considérées.



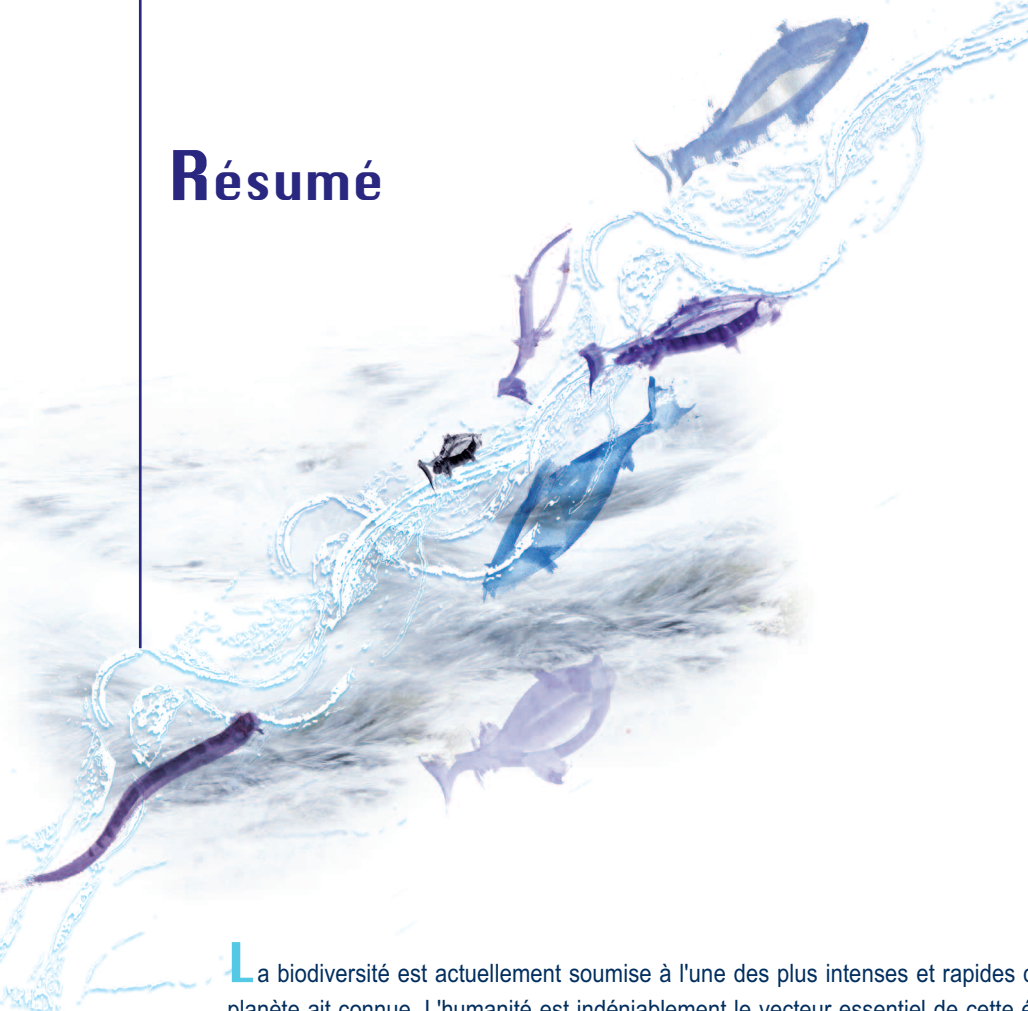
AVERTISSEMENT

Lorsqu'un dispositif de franchissement est adossé à un ouvrage hydraulique, un pré-diagnostic de la passe à poissons est également réalisé en conditions normales d'exploitation (débit d'alimentation et entretien). Ce pré-diagnostic vise à identifier rapidement les dispositifs assurément non adaptés aux espèces concernées et pour lesquels un diagnostic plus poussé pourra s'avérer nécessaire.

Le protocole ICE n'est, en aucun cas, un protocole de diagnostic approfondi du fonctionnement hydraulique du dispositif, ni d'une procédure de contrôle de conformité au sens réglementaire du terme.

Compte tenu de la complexité des mécanismes biologiques de dévalaison et de la nécessité d'avoir une bonne connaissance de l'hydrologie, des modalités de prélèvement et des caractéristiques hydromécaniques des installations, le protocole ICE ne s'attachera pas à l'évaluation de la franchissabilité des ouvrages à la dévalaison.

Résumé



La biodiversité est actuellement soumise à l'une des plus intenses et rapides crises d'extinction que notre planète ait connue. L'humanité est indéniablement le vecteur essentiel de cette érosion drastique. Pressions chimiques caractérisées par ses pollutions de l'eau, des sols et de l'air et par ses conséquences sur les changements climatiques, sur-prélèvements (chasse, pêche, exploitations forestières...), mais aussi pressions physiques par destruction ou rupture d'accès aux habitats indispensables à la survie des espèces, sont autant de causes imputables. Le rôle des pressions physiques et en particulier de la fragmentation des habitats est aujourd'hui mieux appréhendé et très fortement mis en évidence. La communauté internationale s'est emparée progressivement de cet enjeu et l'a traduit en divers textes réglementaires, dont la directive cadre sur l'eau est en Europe un exemple éloquent. L'objectif généralement visé est une restauration ou une préservation de la continuité écologique et des corridors écologiques, devant permettre de réduire, voire d'enrayer une part de ce déclin de la biodiversité.

Avant toute action en faveur de la continuité écologique, il est donc indispensable d'évaluer le degré d'altération des espaces naturels et d'identifier les secteurs les plus problématiques. Au sein des écosystèmes aquatiques, les ouvrages hydrauliques sont l'une des premières causes de dégradation de la continuité écologique, en particulier pour les poissons qui accomplissent de nombreux déplacements indispensables à leur survie. Le diagnostic de l'impact de ces obstacles sur leur circulation est donc un préalable nécessaire à l'évaluation de la gravité de la problématique sur les territoires et à l'identification des ouvrages les plus impactants pour prioriser les interventions.

Jusqu'alors ces évaluations étaient essentiellement réalisées grâce à l'expertise de quelques rares professionnels très spécialisés. L'ampleur souvent insoupçonnée de la présence d'obstacles transversaux sur les réseaux hydrographiques (plus de 70 000 obstacles ont déjà été recensés grâce aux inventaires des pressions réalisés en France dans le cadre des états des lieux de la directive cadre sur l'eau) a toutefois engendré le fort besoin de développement d'une méthode simple et robuste, harmonisée, et applicable par une large gamme d'acteurs de l'environnement et de l'aménagement du territoire.

L'Onema s'est emparé de cette problématique et a coordonné le développement d'un protocole d'évaluation du degré d'impact des obstacles à l'écoulement sur le déplacement des principales espèces de poissons métropolitaines.



Ce *Comprendre pour agir* présente le résultat de ces travaux, dont l'aboutissement est la construction d'un protocole dénommé "Informations sur la Continuité Ecologique" ou ICE.

Organisé en quatre chapitres principaux, ce livre :

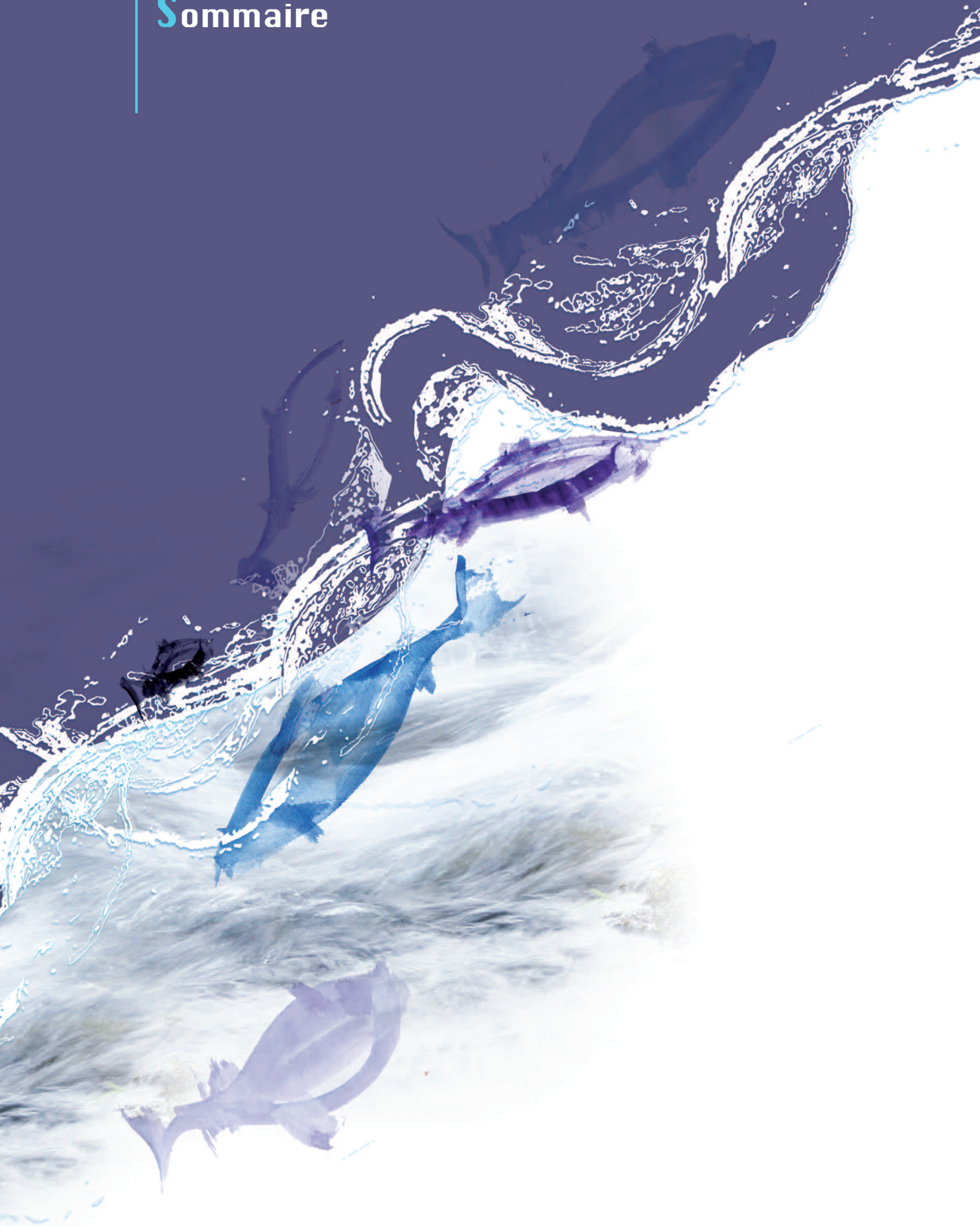
- **expose, sur la base d'une synthèse des connaissances scientifiques internationales, l'importance de la continuité écologique pour l'ichtyofaune.** Le chapitre A rappelle les enjeux bioécologiques relatifs à la libre circulation piscicole, et les différents modes de franchissement classiquement utilisés par les espèces de France métropolitaine. Cette activité est conditionnée par de grands déterminants environnementaux, par l'éthologie des espèces, mais aussi par les aptitudes physiques de chacune d'elles. Les méthodes qui permettent de déterminer ces capacités physiques sont donc exposées, ainsi que les principales conditions limitantes pouvant être rencontrées au niveau des obstacles. Ce chapitre présente aussi les différents types de barrières physiques et leurs principaux impacts sur les peuplements de poissons ;
- **décrit les principes généraux du protocole ICE.** Le chapitre B énonce les concepts fondateurs et la procédure générale d'application de la méthode et expose une typologie des principaux obstacles considérés dans cette démarche. En outre, il présente la liste des onze groupes d'espèces ICE construits en fonction de leurs capacités physiques de franchissement, ainsi que les cinq classes de franchissabilité retenues pour restituer le degré d'impact des obstacles ;
- **présente en détail la méthode d'application du protocole et accompagne le lecteur en explicitant chaque étape de la procédure de diagnostic de la franchissabilité des obstacles à la montaison.** Ce chapitre C spécifie la méthode de calcul des indicateurs pour chacun des cinq grands types d'obstacles considérés. Il traite aussi du cas particulier de l'anguille européenne qui peut utiliser des modes de déplacement particuliers. L'ensemble des contraintes topographiques et hydrauliques sont intégrées et la prise en compte des variations hydrologiques est également proposée pour orienter l'opérateur dans sa stratégie de diagnostic. Des logigrammes décisionnels restituent chaque démarche, ce qui facilite l'application du protocole par une large gamme d'utilisateurs ;
- **aborde enfin le cas spécifique des obstacles équipés de dispositifs de franchissement.** Ce chapitre D référence et décrit différents types d'aménagement pouvant être rencontrés sur le territoire. Il expose les principales causes de dysfonctionnement de ces ouvrages et une méthode de pré-diagnostic rapide de leur qualité.

Richement illustré, ce *Comprendre pour agir* doit plus généralement permettre à chacun de comprendre précisément la méthodologie développée, de l'appliquer sur son territoire, voire d'utiliser tout ou partie des connaissances rassemblées pour d'autres besoins spécifiques.

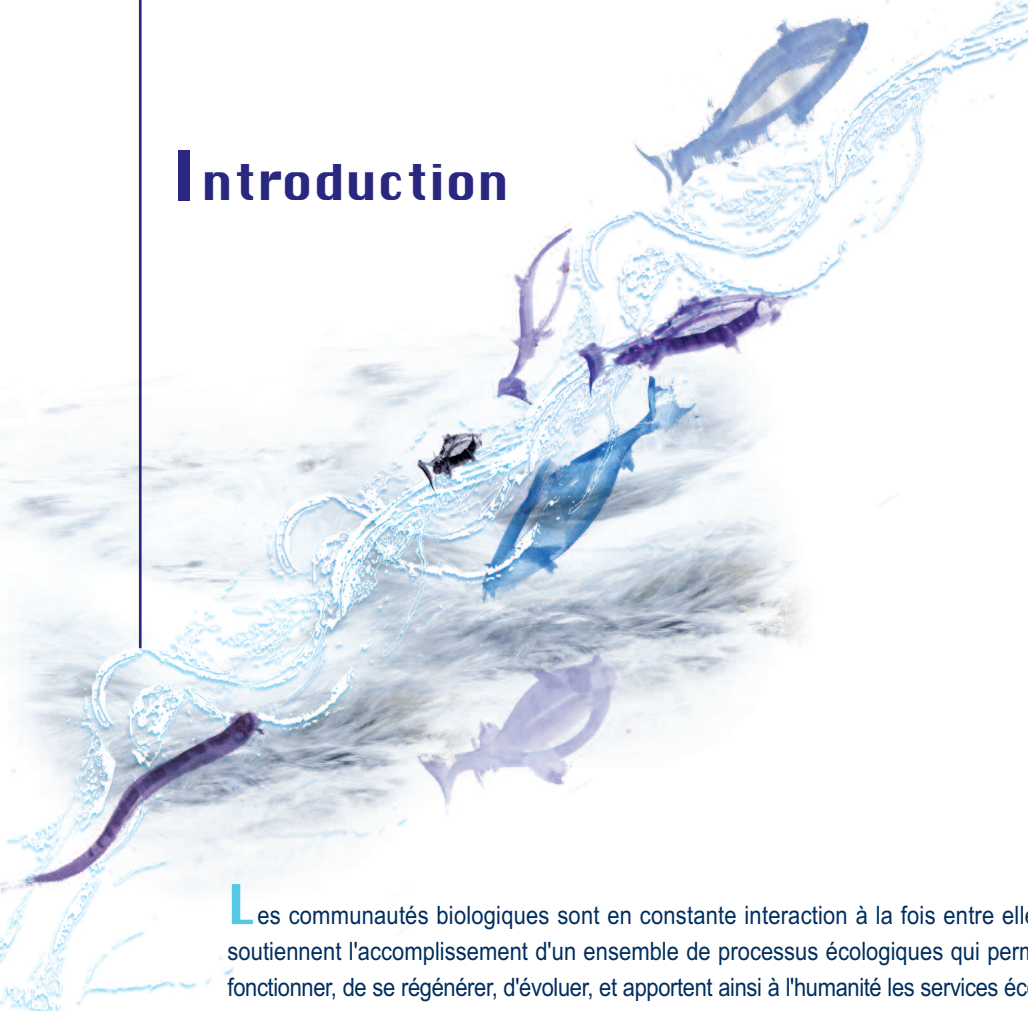
- 12 ■ Introduction
- 13 ■ Continuité écologique et ichtyofaune
- 43 ■ Principes généraux du protocole ICE
(Informations sur la continuité écologique)
- 75 ■ Diagnostic de la franchissabilité à la montaison
- 150 ■ Prédiagnostic pour les obstacles équipés de dispositifs
de franchissement piscicole
- 182 ■ Bibliographie, sigles & abréviations



Sommaire



Introduction



Les communautés biologiques sont en constante interaction à la fois entre elles et avec leur milieu. Elles soutiennent l'accomplissement d'un ensemble de processus écologiques qui permettent aux écosystèmes de fonctionner, de se régénérer, d'évoluer, et apportent ainsi à l'humanité les services écosystémiques indispensables à sa survie. Depuis les dernières révolutions industrielles et agricoles, l'espèce humaine a considérablement accru son impact sur la biodiversité, en démultipliant et en intensifiant ses pressions sur les milieux naturels. Les XX^e et XXI^e siècles sont ainsi devenus le siège de l'une des plus importantes crises d'extinction d'espèces que la Terre ait connues. Si les pollutions chimiques sont de longue date une source d'impacts bien identifiée et font l'objet de nombreuses mesures de réduction de leurs émissions, les effets de l'altération physique des milieux ont été plus récemment pris en compte et soulignés. Leur importance est pourtant majeure et la fragmentation des habitats des biocénoses est aujourd'hui considérée comme l'une des premières causes d'érosion de la biodiversité. Cette prise de conscience résulte d'une meilleure compréhension du rôle essentiel de la connectivité des espaces naturels pour le bon déroulement des cycles biologiques des espèces vivantes, ainsi que la réalisation des fonctions qu'elles assurent, pour le brassage génétique qui sous-tend la survie des populations et l'évolution des espèces, et pour l'accomplissement des processus géophysiques et géochimiques au sein des écosystèmes.

La continuité écologique

La continuité écologique est une acception relativement récente, introduite pour la première fois par le botaniste britannique Francis Rose (Rose, 1974). Structurés par le cycle de l'eau et par le continuum de leurs écoulements, les écosystèmes aquatiques continentaux évoquent intuitivement cette notion. Pourtant, les premiers travaux de recherche portant sur cette thématique sont issus de l'écologie terrestre, en particulier de l'écologie des paysages et de l'étude des systèmes forestiers. Plusieurs termes sont régulièrement et assez indifféremment usités pour y faire référence, tels que "continuité des paysages", "continuité biologique", "connectivité" ou bien encore "corridors écologiques" ou "trames écologiques". Si plusieurs définitions de la continuité écologique existent, la vision la plus répandue et partagée concernant les écosystèmes aquatiques se rapproche du concept de "continuité des paysages" (Økland et al. 1996; Fritz et Larsson 1996; Ohlson et Tryterud 1999), c'est-à-dire de "la notion d'habitats disponibles dans le temps et dans l'espace, et de l'importance de leur juxtaposition pour la dispersion et la dynamique des métapopulations d'espèces. L'échelle spatiale est habituellement non définie et peut être différente pour chaque espèce" (Norden et Appelqvist, 2001). La directive européenne cadre sur l'eau a généralisé l'emploi de ce néologisme au sein du monde des acteurs de l'environnement, mais



elle en a simplifié le concept en considérant qu'elle pouvait être assimilée "*aux conditions permettant une migration non perturbée des organismes aquatiques et le transport de sédiments*". En France, la loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006 a réaffirmé l'importance de la continuité écologique et en a précisé la définition. La continuité écologique d'un cours d'eau est ainsi présentée comme "*la libre circulation des organismes vivants et leur accès aux zones indispensables à leur reproduction, leur croissance, leur alimentation ou leur abri, le bon déroulement du transport naturel des sédiments, ainsi que le bon fonctionnement des réservoirs biologiques (connexions, notamment latérales, et conditions hydrologiques favorables)*".

Les obstacles à l'écoulement

La présence et la multiplication d'ouvrages transversaux érigés par l'homme au travers des rivières (source d'énergie, eau potable, irrigation, voies routières et ferroviaires, navigation, stabilisation du lit des rivières, aquaculture, loisir...) a fortement contraint les possibilités de déplacement naturel des biocénoses aquatiques. Ces ouvrages bouleversent également profondément l'hydromorphologie des rivières (ralentissement des vitesses d'écoulement, augmentation de la profondeur, diminution ou arrêt du transit sédimentaire grossier...) et engendrent des modifications physicochimiques importantes de l'eau. Outre une altération des possibilités de déplacement des biocénoses, la présence d'obstacles à l'écoulement dégrade donc également la continuité écologique via une altération de la qualité et un appauvrissement de la diversité des habitats disponibles dans l'espace pour les différentes espèces aquatiques. Les conséquences sur les communautés biologiques peuvent être dramatiques. Le déclin de nombreuses populations de poissons migrateurs amphihalins en est un exemple éloquent, notamment lorsque l'accès à des sites de fraie fonctionnels est partiellement ou totalement altéré.

Cette fragmentation des cours d'eau est une entrave directe à la préservation de la qualité des milieux aquatiques et de la biodiversité. En France, plus de 70 000 obstacles à l'écoulement (barrages, seuils...) ont été référencés sur les cours d'eau et ce recensement est encore loin d'être exhaustif. Ce contexte a engendré la nécessité de développer de nouveaux "outils" de surveillance standardisés, permettant d'appréhender sur l'ensemble d'un territoire, les risques d'altération de la continuité écologique générés par les obstacles à l'écoulement.

Une méthode d'évaluation de la franchissabilité des obstacles

Ce *Comprendre pour agir* présente une méthode d'évaluation dénommée **ICE** et les principes qui ont fondé sa construction. Ce sigle correspond aux initiales de "Informations sur la Continuité Ecologique".

Au vu des connaissances scientifiques actuellement disponibles, la méthode décrite est exclusivement dédiée **aux impacts des ouvrages transversaux sur la circulation de l'ichtyofaune**. Ces infrastructures peuvent à la fois engendrer des obstacles de natures thermique, chimique (oxygène, nutriments, substances toxiques...) et physique (hauteur de chute, pente, vitesse du courant, turbulences, épaisseur de la lame d'eau...). Dans le cadre de ce document, seules les **barrières transversales de nature physique** ont été considérées.

Le protocole ICE repose sur la confrontation des caractéristiques topographiques et hydrauliques au niveau d'un obstacle et des capacités physiques de déplacement (par nage, saut ou reptation) des espèces de poissons considérées. Il s'appuie sur un recueil de données descriptives des obstacles, en évitant au maximum le recours à l'expertise. Le résultat de cette analyse permet de diagnostiquer un "risque" de blocage plus ou moins fort au niveau de chaque site pour une espèce ou un groupe d'espèces piscicoles ciblées. Une attention particulière a été portée à l'opérationnalité pratique de la méthode (temps d'investigation et moyens humains nécessaires), garantissant une utilisation sur de vastes territoires.



Ainsi, ce *Comprendre pour agir* s'organise en quatre chapitres :

■ **le chapitre A**, expose, sur la base d'une synthèse des connaissances scientifiques actuelles, **l'importance de la continuité écologiques pour l'ichtyofaune**. Il rappelle les enjeux bio-écologiques relatifs à la libre circulation piscicole, les différents types de barrières physiques existants, ainsi que leurs principaux impacts sur les peuplements de poissons. Au sein de ce chapitre, une synthèse des capacités physiques de franchissement des différentes espèces métropolitaines est également réalisée, en précisant les paramètres qui permettent de les évaluer et les principaux facteurs qui conditionnent ces franchissements ;

■ **le chapitre B** décrit les **principes généraux du protocole ICE**. Il définit la démarche d'application de la méthode et les principaux types d'obstacles traités. Il présente également la liste des onze groupes d'espèces ICE construits en fonction de leurs capacités de nage et de saut, et définit précisément les cinq classes de franchissabilité retenues dans le cadre du protocole pour restituer le degré d'impact des obstacles ;

■ **le chapitre C** précise la **procédure de diagnostic de la franchissabilité des obstacles à la montaison**. Il détaille la méthode de calcul des indicateurs pour chacun des cinq grands types d'obstacles considérés, en traitant également le cas particulier de l'anguille européenne qui peut utiliser des modes de déplacement particuliers. Chaque démarche est synthétisée sous la forme de logigrammes décisionnels qui facilitent l'application du protocole par une large gamme d'utilisateurs ;

■ enfin, **le chapitre D** se consacre plus spécifiquement aux **obstacles équipés de dispositifs de franchissement**. Il synthétise et expose les principes des différentes solutions techniques qui peuvent être aujourd'hui rencontrées. En outre, ce chapitre présente une méthode de prédiagnostic de la qualité de ces dispositifs de franchissement, permettant d'identifier rapidement les passes à poisson manifestement mal ou non adaptées aux espèces considérées.



A

Continuité écologique & ichtyofaune

14 ■ Les enjeux de la circulation piscicole

33 ■ Les capacités de franchissement des poissons



Les enjeux de la circulation piscicole

Contexte biologique, mobilité et migration chez les poissons

Comme beaucoup d'autres animaux libres (non fixés), les poissons sont continuellement en mouvement pour des raisons liées à l'exécution de leurs fonctions vitales :

- se protéger des contraintes du milieu ainsi que des prédateurs et éventuellement des compétiteurs, de manière à assurer leur survie ;
- se nourrir dans les meilleures conditions afin d'assurer leur croissance et leur maturation sexuelle ;
- se reproduire dans les conditions les plus favorables, de manière à assurer la pérennité de l'espèce.

Ces besoins évoluant au cours du cycle de vie, les déplacements entre habitats différents s'inscrivent dans une séquence temporelle calquée sur les stades de vie des individus (larve, alevin, juvénile, adulte). Dès lors, la structure spatiale d'une population est le résultat du comportement collectif des individus qui la compose en fonction des ressources existantes dans les différents habitats accessibles au sein du cours d'eau.

Suivant leur fonction, ces mouvements écologiques s'expriment à des échelles de temps variables (au cours de la journée ou au cours d'un cycle annuel de vie), sur des distances variables (de quelques centimètres à plusieurs milliers de kilomètres) et dans des sens variables (longitudinalement vers l'amont ou vers l'aval, latéralement entre le cours principal et les annexes fluviales, verticalement dans les lacs et les rivières profondes).

Selon des principes théoriques, les contraintes associées au déplacement (exposition à la prédation, coût énergétique) sont compensées par les avantages biologiques procurés par le nouvel habitat. Si le rapport coût-bénéfice est favorable, l'utilisation est dite stratégique car les différents habitats disponibles utilisés permettent à l'individu d'augmenter ses chances de transmettre avec succès ses gènes dans les futures générations (Lucas et Baras, 2001).

■ Les grandes catégories de mouvements chez les poissons

Dans des milieux dynamiques et multidimensionnels comme les rivières, l'utilisation de l'espace est une combinaison entre des déplacements actifs qui nécessitent une dépense d'énergie et des déplacements passifs qui consistent en un transport par le milieu en mouvement.

Quand il possède des repères, le poisson peut compenser activement un déplacement passif engendré par le milieu dynamique et maintenir un contrôle comportemental sur son déplacement net. Il est donc important de comprendre la contribution relative entre les déplacements passifs et actifs pour appréhender les processus sous-jacents à l'utilisation de l'espace et à la distribution des populations (Mauritzen *et al.*, 2003 in Sonny, 2006).

Les mouvements de transports, dérive et dispersion

Chez les individus au stade adulte, il s'agit souvent de déplacements forcés vers l'aval à la suite de fortes crues. On peut dans ces cas particuliers rencontrer des cas de dérive passive (le poisson se laisse emporter par le courant) et de dérive semi-active (le poisson nage à contre courant pour résister, mais sa vitesse est inférieure à celle du courant opposé, le déplacement se fait vers l'aval). (Figure 1, Pavlov, 1994).

Ces mouvements sont en général, suivis d'un retour au site de départ lorsque les conditions hydrologiques redeviennent favorables. Mais lors d'évènements exceptionnels, il arrive qu'une grande partie de la population puisse être déplacée sur de longues distances et le retour vers les aires de résidence peut s'avérer difficile voire impossible notamment si la rivière est fragmentée par des obstacles physiques.

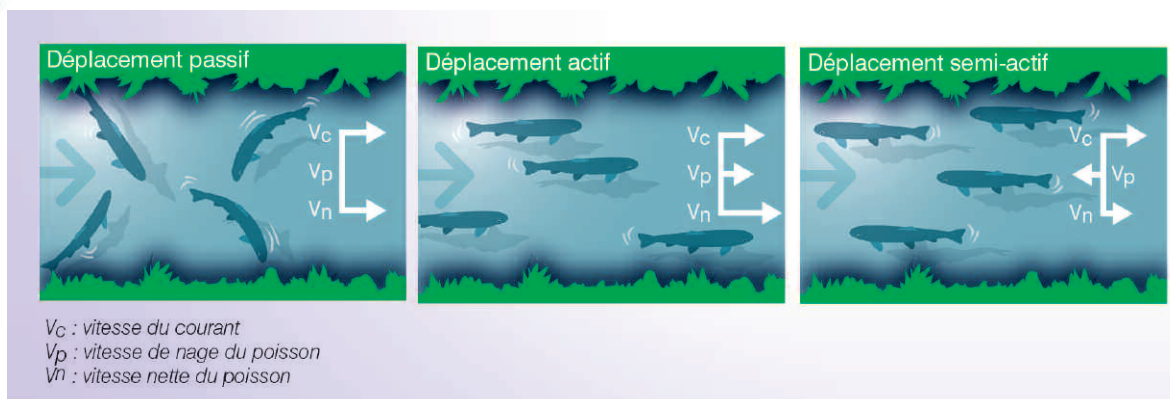
Chez les larves et les alevins, le phénomène de **dérive** est un phénomène naturel indispensable qui a une signification biologique plus fondamentale et qui est défini comme des mouvements passifs entre la zone de ponte et d'émergence et les premiers habitats de croissance. La dérive constitue une étape importante dans le cycle de vie du poisson qui permet d'associer la dispersion à l'utilisation de zones de nurseries. Elle est généralement assimilée à un déplacement trophique.

Si la dérive est considérée comme un mouvement passif, son déclenchement semble être conditionné par des conditions environnementales bien précises propres à chaque espèce (Sonny *et al.*, 2006) qui laisse à penser que les individus ne se laissent pas emporter par le courant à n'importe quel moment. On parle le plus souvent de dérive pour des déplacements de l'amont vers l'aval dans les cours d'eau, mais le transport des larves leptocéphales de l'anguille européenne depuis la mer des Sargasses vers les côtes européennes et Nord africaines *via* le Gulf Stream s'intègre aussi dans cette catégorie de mouvement.

Dans certains cas, la dérive peut faire partie intégrante du cycle de migration d'une espèce, ce qui implique qu'elle affecte la majeure partie des individus et sera compensée ultérieurement par une migration inverse (cas des larves leptocéphales de l'anguille). Dans d'autres cas, elle est unidirectionnelle et ne sera pas compensée par un déplacement inverse (Hanski, 1999 ; Nathan *et al.*, 2003 ; Sonny, 2006).

Figure

1



Types de migrations vers l'aval. Repris de Sonny (2006), modifié de Pavlov (1994).

Les mouvements actifs

Les mouvements actifs non périodiques résultent d'une modification sporadique du milieu à la suite d'une perturbation non cyclique comme un évènement de pollution, une sécheresse, la réalisation de travaux en cours d'eau.

Vu leurs caractères plus imprévisibles, ils ne s'intègrent pas dans le cycle biologique d'une espèce tel que défini dans la figure 3. Ils peuvent être considérés comme des tactiques, qui sont en réalité des variations par rapport au schéma du cycle biologique typique, de manière à répondre avec succès à des modifications des facteurs de l'environnement. Il s'agit alors d'un comportement adaptatif à des conditions écologiques particulières, qui permet d'assurer la survie de l'individu (Lévêque, 2006). Ils sont généralement suivis du retour des individus sur site, mais peuvent s'accompagner d'une mortalité plus ou moins forte.

Par contre, les modifications définitives des conditions physico-chimiques et trophiques qui s'écartent de la zone de tolérance des espèces entraînent l'**émigration** des espèces mal adaptées vers des zones plus favorables en même temps qu'elles constituent un appel pour des espèces résistantes plus adaptées.

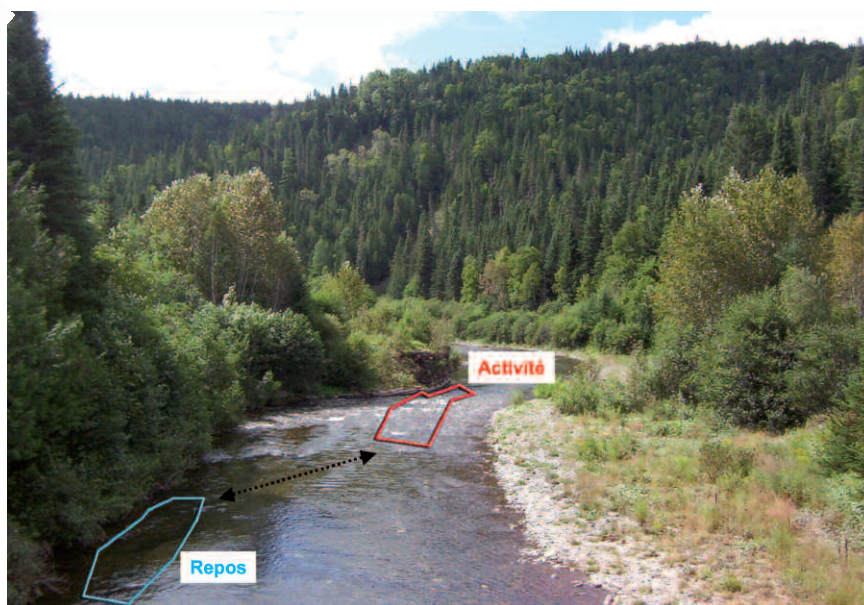
Ces déplacements modifient la structure des communautés et préfigurent la constitution de **nouvelles ichtyofaunes locales**. Ils doivent être pris en considération lorsqu'on étudie des rivières et des plans d'eau (réservoirs de barrages, centrale hydroélectrique, étang en évolution) susceptibles de connaître de tels changements d'ordre physico-chimique.

Attention. Les enjeux de ces types de mouvements dans le contexte actuel de réchauffement global des masses d'eau et donc de recherche accrue de refuges thermiques temporaires, voire d'adaptations à plus long terme sont à prendre en considération avec le plus grand sérieux, d'autant plus que les espèces exotiques seront probablement moins sensibles à ce phénomène de réchauffement (Hendrickx *et al.*, 2011).

Les **mouvements périodiques à l'échelle du cycle journalier** concernent les utilisations alternées des aires de repos et d'activité, au sein du domaine vital journalier du poisson (Baras, 1992 ; Ovidio, 1999). Ces zones constituent très souvent des habitats hydromorphologiquement très différents (Figure 2). L'étendue, la direction et la fréquence de ces mouvements sont variables en fonction de l'espèce considérée, des individus ou des stades de développement pour une même espèce, mais aussi en fonction de la saison et des conditions environnementales.

Figure

2



© M. Ovidio - Université de Liège - LDPH

Illustration de la séparation spatiale entre un centre d'activité (en zone courante) et une aire de repos (en zone calme) chez la truite commune à l'échelle du cycle journalier.

Les **déplacements ontogénétiques** sont liés au fait que les différentes phases du développement du poisson (larve, alevin, juvénile, adulte) correspondent à des besoins nutritionnels, des comportements alimentaires et des exigences écologiques, physiologiques et biologiques différentes, ce qui suppose dans beaucoup de cas la fréquentation d'habitats différents (Lévêque et Paugy, 2006). Par exemple, les larves ne peuvent consommer que des particules de petite taille, comme le phytoplancton, le zooplancton et certains débris organiques. Les individus se déplacent en fonction de leurs capacités intrinsèques et de leurs besoins trophiques selon des directions et des échelles spatiales très variables. De plus, l'augmentation de la taille du poisson modifie ses capacités de déplacement ainsi que la taille et la nature des proies (ou des aliments) qu'il consomme.

Les **migrations** sont des **déplacements périodiques saisonniers très communs chez les poissons**. Une migration, selon Northcote (1979), est un déplacement entre deux habitats fonctionnels se produisant de manière régulière durant la vie de l'individu et concernant une grande partie de la population.

La nécessité d'utiliser des biotopes distincts pour les différents stades de développement, et notamment la recherche de sites favorables à la ponte puis au bon développement des juvéniles, conduit les espèces à effectuer des migrations parfois de grandes amplitudes entre des habitats d'alimentation, de repos et de reproduction.

Chez un grand nombre d'espèces, la reproduction implique l'**agrégation synchronisée** d'un nombre important d'individus matures des deux sexes d'une même espèce sur les aires de reproduction durant une courte période de l'année (Lucas et Baras, 2001). Les migrations réalisées pour rejoindre les frayères représentent alors souvent les mouvements les plus apparents.

Le déclenchement des comportements migratoires résulte de causes internes et externes à l'individu (Lucas et Baras, 2001). Notons l'influence de l'interaction entre l'état de maturation de l'individu, la photopériode, la température de l'eau ainsi que les conditions hydrologiques et météorologiques (Lucas et Baras, 2001). Par exemple, la ponte a lieu généralement à une période où les conditions environnementales sont les plus favorables à la survie des oeufs et des larves.

Beaucoup d'espèces ont un **cycle saisonnier de reproduction** (Figure 3) et la stratégie de reproduction d'une espèce dans un environnement donné recouvre un ensemble de traits biologiques comme l'âge de la première reproduction, la relation entre taille (ou âge) et fécondité, le comportement parental, la saison de reproduction, la taille des gamètes (Lévêque et Paugy, 1999 et 2006).

Les migrations ne représentent qu'une part des déplacements que les poissons effectuent au cours de leur cycle biologique, mais ils sont de loin ceux qui sont les plus impactés par la **fragmentation de l'habitat** en raison de leur double trajectoire, le plus souvent de l'aval vers l'amont (montaison) puis de l'amont vers l'aval (dévalaison) et des distances parcourues qui peuvent atteindre dans le cas des migrateurs amphihalins plusieurs milliers de kilomètres.

Si ces migrations sont les plus fréquentes, il ne faut pas négliger l'importance des migrations multidimensionnelles qui obligent par exemple, le brochet à remonter le cours d'eau (migration longitudinale) avant de se diriger vers une annexe hydraulique (bras mort...) plus favorable à sa reproduction.

Figure

3

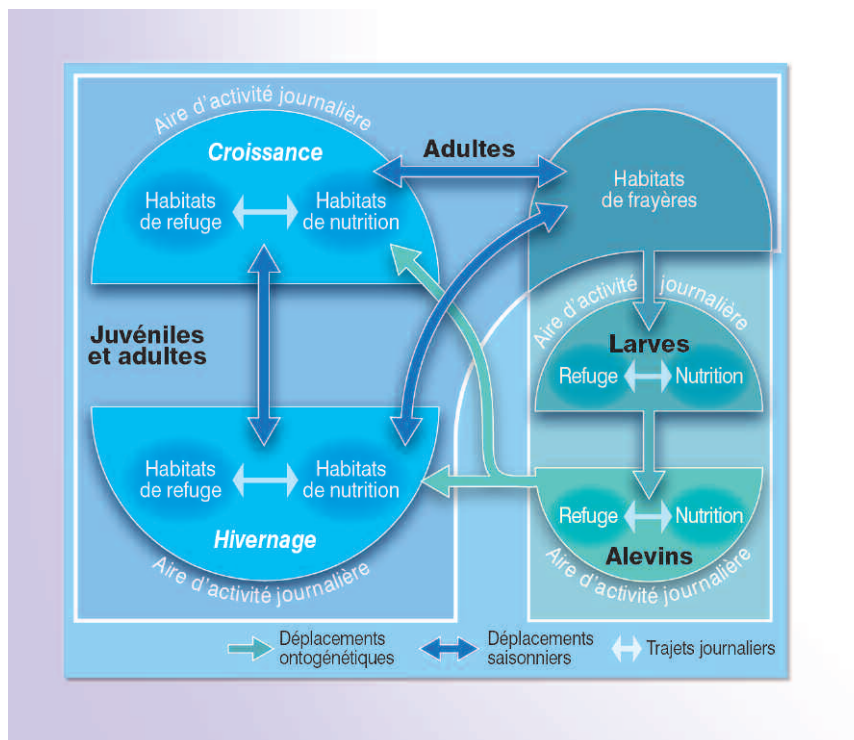


Schéma représentant une partie de la diversité des mouvements effectués par les poissons au cours de leur cycle biologique. Repris de Baras (1992).

Attention. Lors d'aménagements des milieux aquatiques, il est donc très important de **bien connaître le comportement migrateur** des différentes espèces de poissons dans les eaux courantes naturelles et régulées afin de bien prendre en compte la libre circulation de toutes les espèces de poissons, notamment aux périodes critiques de leur activité migratrice.

■ Les différents types de migrateurs

Selon leurs comportements de migration, les espèces de poissons de France métropolitaine peuvent être regroupées en quatre grandes catégories éco-éthologiques (Philippart et Ovidio, 2007).

Type 1 - Les migrateurs amphibiotiques anadromes

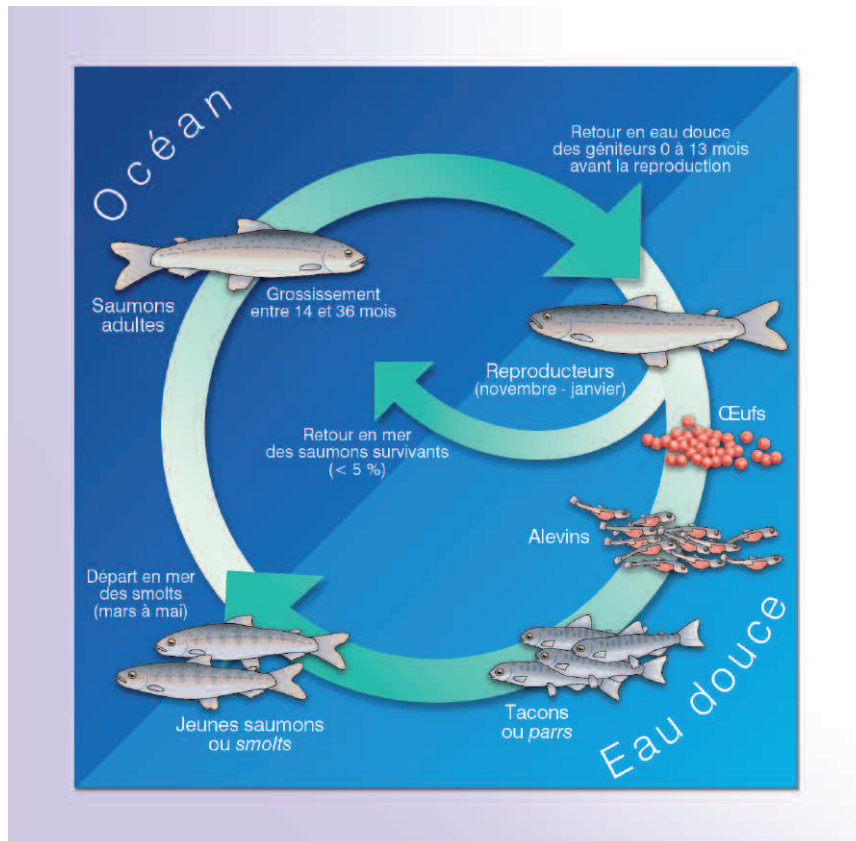
Les poissons migrateurs amphibiotiques anadromes sont dans l'obligation de se déplacer entre les eaux douces et la mer afin de réaliser complètement leur cycle biologique. Ils vivent en mer et viennent se reproduire en eau douce. La migration vers la mer concerne essentiellement les juvéniles et, dans une moins grande proportion, les adultes ayant survécu à la reproduction (Figure 4).

Ils parcourent ainsi plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres (fonction de la variabilité spatiale de la localisation du site de croissance et du site de reproduction) au cours de leur cycle vital et sont communément qualifiés de grands migrateurs.

On retrouve parmi ce groupe, les espèces suivantes : truite de mer (*Salmo trutta* – écotype migrateur), saumon atlantique (*Salmo salar*), lamproie fluviatile (*Lampetra fluviatilis*), lamproie marine (*Petromyzon marinus*), grande alose (*Alosa alosa*), alose feinte (*Alosa fallax fallax*), les mullets (*Chelon labrosus* et *Liza ramada*) et l'esturgeon (*Acipenser sturio*).

Figure

4



Cycle migratoire d'un migrateur amphibiotique anadrome (cas du saumon atlantique).

Type 2 - Les migrateurs amphibiotiques catadromes

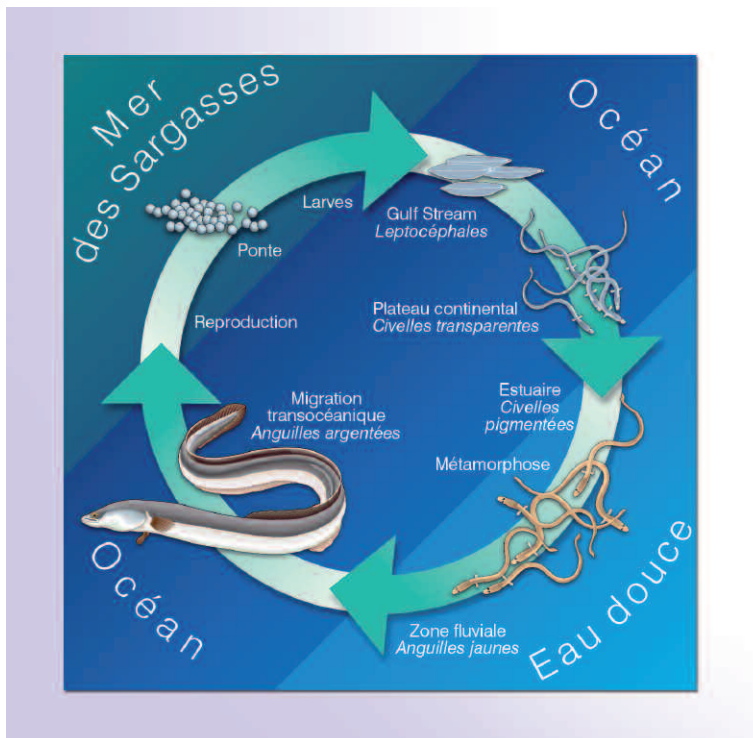
Les poissons migrateurs catadromes sont également des grands migrants, dans l'obligation de se déplacer entre l'eau douce et l'eau de mer pour réaliser leur cycle biologique, mais avec un cycle inversé par rapport aux migrateurs amphibiotiques anadromes. Ils remontent les fleuves au stade juvénile pour coloniser le réseau hydrographique (migrateurs amphibiotiques catadromes), tandis que les adultes redescendent vers la mer pour s'y reproduire (Figure 5).

Deux espèces font partie de cette catégorie en France métropolitaine, l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) qui fait l'objet d'une grande attention en matière de protection et de restauration (règlement européen et plan de gestion national) et le flet (*Platichthys flesus*).

La reproduction des anguilles européennes a lieu en mer des Sargasses, au sud de la Floride et elles sont donc toutes issues du même stock. Aidées par les courants marins, les larves dites leptocéphales parcourent environ 6 000 km pour traverser l'Atlantique. Avant d'aborder les côtes européennes, les larves se métamorphosent en civelles et ressemblent alors à des anguilles transparentes de quelques centimètres de long lorsqu'elles arrivent pour coloniser les eaux littorales et continentales. Certains individus se sédentarisent en estuaire tandis que d'autres remontent les cours d'eau sur de très longues distances pouvant dépasser plusieurs centaines de kilomètres. Après 10 à 25 ans de croissance (un peu moins pour les mâles, un peu plus pour les femelles), l'anguille jaune se métamorphose en anguille argentée et réalise alors une migration de dévalaison vers la mer des Sargasses pour la reproduction.

La reproduction des flets a lieu en mer de janvier à avril sur des fonds meubles autour de l'isobathe des 50 m pouvant être l'objet de grands rassemblements (Keith *et al.* 2011). Après l'éclosion, et quelques semaines de vie pélagique, les jeunes se rapprochent de la côte, puis pénètrent en eau saumâtre et douce pour continuer leur développement. Ils vivent ainsi la plus grande partie de leur temps dans les estuaires et les eaux douces des fleuves (jusqu'à des distances de plusieurs centaines de kilomètres de la mer). Au moment de la reproduction, les adultes réalisent une dévalaison vers la mer où ils se reproduisent.

Figure 5



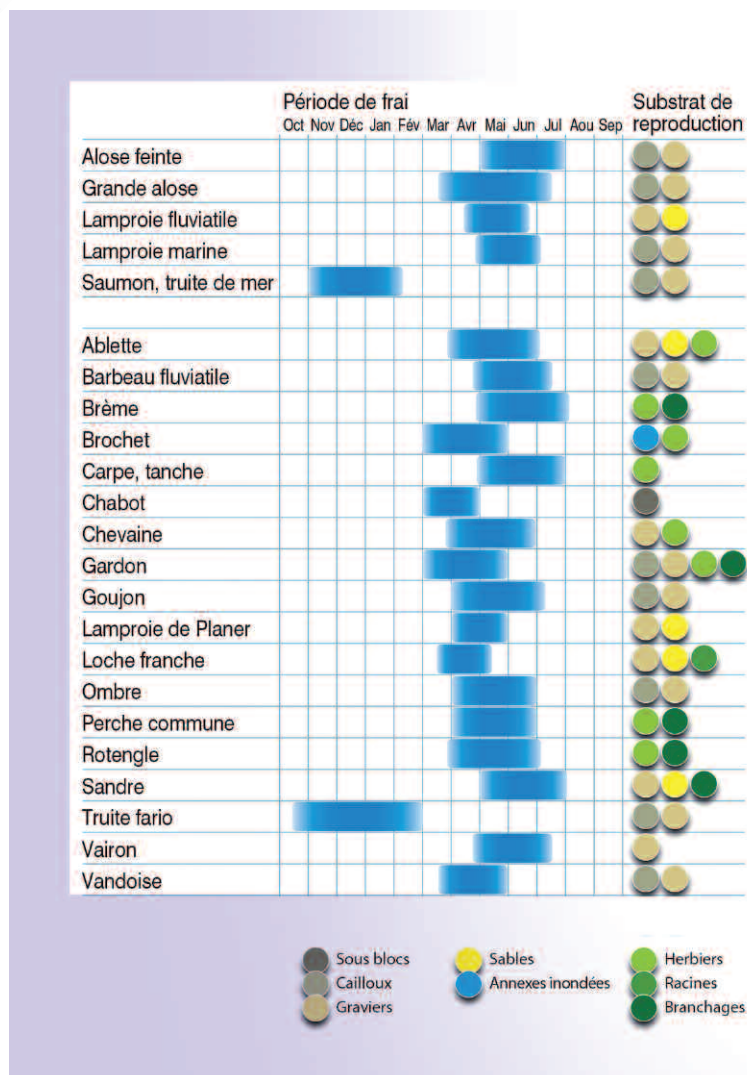
Cycle migratoire d'un migrateur amphibiotique catadrome (cas de l'anguille européenne).

Type 3 - Espèces holobiotiques potamodromes exigeantes pour le substrat de pontes

Ce sont des espèces qui effectuent la totalité de leur cycle vital en eau douce et qui se déplacent dans les cours d'eau et les affluents à la recherche de zones de reproduction particulières indispensables pour le dépôt des œufs (Figure 6). Les zones recherchées peuvent être :

- des bancs de graviers assez meubles et bien oxygénés chez les espèces d'eau vive (espèces rhéophiles) et reproductrices litophiles (pontes sur ou dans le gravier). On retrouve la truite de rivière (*Salmo trutta*) et l'ombre commun (*Thymallus thymallus*) parmi les salmonidés et le barbeau fluviatile (*Barbus barbus*), méridional (*Barbus meridionalis*), la vandoise (*Leuciscus leuciscus*) ainsi que, dans une certaine mesure, le hotu (*Chondrostoma nasus*), le toxostome (*Parachondrostoma toxostoma*) et le spirin (*Alburnoides bipunctatus*) parmi les cyprinidés d'eau vive ;
- des plages de végétation chez certaines espèces d'eau lente et reproductrices phytophiles (pontes d'œufs collants sur les plantes) comme le brochet (*Esox lucius*) en fin d'hiver et au printemps, ou la carpe (*Cyprinus carpio*) et la tanche (*Tinca tinca*) en été ;
- des zones particulières de gros cailloux ou de graviers chez des espèces nidificatrices comme le chabot (*Cottus sp*) et la lamproie de Planer (*Lampetra planeri*).

Figure 6



Période de frai et type de substrats de reproduction des principales espèces de poissons de France.

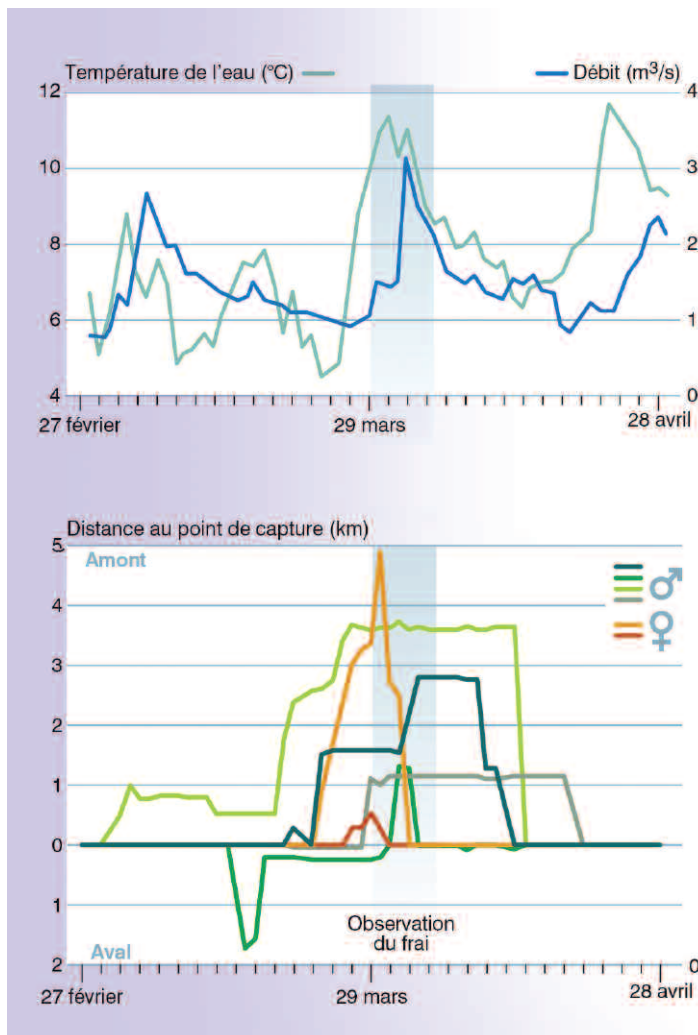
Type 4 - La plupart des autres espèces holobiotiques potamodromes

La plupart des autres espèces holobiotiques potamodromes (100 % d'eau douce) ont aussi naturellement tendance à migrer au moment de la reproduction mais sans que cela soit une condition impérative au succès de la reproduction car il existe généralement des frayères dans la zone ou le bief fluvial de résidence. C'est le cas des espèces ubiquistes-euryèces assez peu exigeantes dans le choix de leur substrat de ponte (Figure 6) : gardon (*Rutilus rutilus*), brème commune (*Abramis brama*) et bordelière (*Blicca bjoerkna*), perche (*Perca fluviatilis*).

NB Pour ces espèces, il reste important de permettre la migration d'un certain nombre d'individus ainsi que la dispersion des jeunes stades afin d'éviter l'isolement génétique des populations qui se développent dans les biefs entre deux obstacles physiques successifs.

Si les cycles biologiques des grands migrateurs (types 1 et 2) sont relativement bien connus depuis de nombreuses années, ce n'est que beaucoup plus récemment que l'on a pris conscience de l'importance des phénomènes migratoires (ou de mobilité) chez les espèces de poissons holobiotiques potamodromes appartenant aux types 3 et 4 (Gowan *et al.*, 1994). Bien que ces espèces vivent 100% de leur temps en eau douce, elles ont également un besoin biologique de se déplacer, souvent sur de longues distances pour accomplir l'ensemble de leurs fonctions biologiques et ont des patterns de mobilité bien typiques (Figure 7).

Figure 7



Exemple de déplacements effectués dans l'Aisne (Ardenne Belge) par six ombres communes (Thymallus thymallus) suivis par radio-pistage en période circum reproduction.

On remarque que vers la fin du mois de mars, des conditions environnementales particulières (augmentation de température dans une gamme de 5-8°C et phase de diminution de débit) déclenchent les migrations de reproduction vers l'amont où sont situées les frayères. Les individus suivis restent de un à quelques jours sur les sites de reproduction et entament ensuite un homing post-reproducteur très précis dans le sens de la dévalaison qui les ramène vers les secteurs de rivières occupés avant la reproduction.

Si toutes les espèces de poissons n'ont pas fait l'objet d'études poussées au point de vue de leur mobilité, le contrôle de pièges de capture dans les **passes migratoires** démontre que chez bon nombre d'espèces de poissons, une partie de la population peut effectuer des mouvements de plus grandes amplitudes vers l'amont, souvent à l'approche de la période de reproduction mais aussi parfois complètement en dehors (Lucas et Baras, 2001 ; Slavik *et al.*, 2009 ; Prchalova *et al.*, 2011).

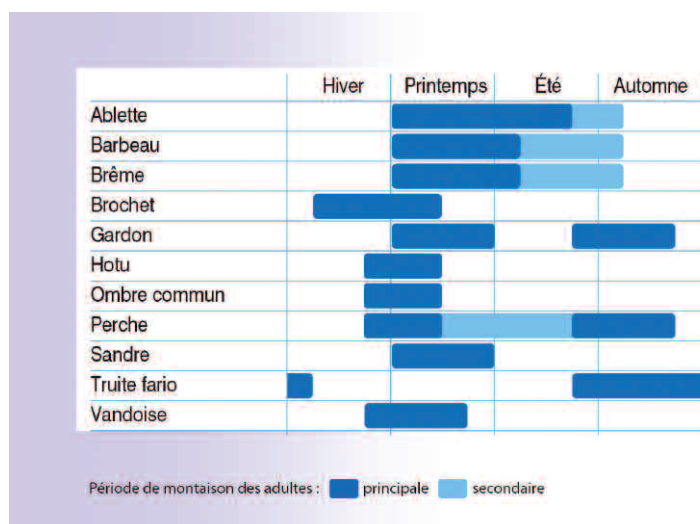
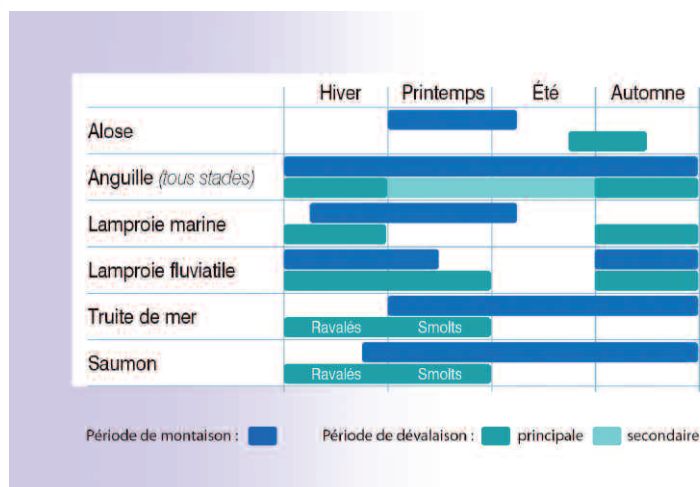
Il s'agit souvent de mouvements qui sont inscrits dans leur cycle biologique (refuge, activité, reproduction). Mais dans certains cas, il peut également s'agir d'**individus « explorateurs »** (infime partie de la population), qui développent des tactiques comportementales particulières, notamment adaptées à la découverte de nouveaux habitats exploitables ou re-exploitable, par exemple lors de la réouverture d'axes migratoires nouveaux ou anciennement bloqués.

Même chez les espèces potamodromes, la migration de montaison fait toujours partie d'un processus démographique général (bilan migratoire avec émigration et immigration) qui comprend aussi une dévalaison d'adultes reproducteurs (qui ont pondu ou qui vont pondre) ou/et de jeunes issus de la reproduction.

■ Les principales périodes de migrations

Les migrations ne s'effectuent pas aux mêmes périodes pour toutes les espèces, même si elles se produisent le plus souvent au printemps et à l'automne (Figure 8). Aussi, lorsque l'on considère l'ensemble des espèces présentes sur certains cours d'eau ou tronçons de cours d'eau, des migrations peuvent être observées toute l'année.

Figure 8



Principales périodes de migration des différentes espèces migratrices amphibiotes et principales périodes de migration des adultes d'espèces holobiotiques.

Les différents types de barrières

Les cours d'eau présentent de nombreux ouvrages transversaux anthropiques susceptibles de réduire la connectivité longitudinale et d'exercer un effet négatif plus ou moins marqué sur les populations de poissons.

Un ouvrage peut constituer un obstacle total à la migration, c'est à dire qu'il peut se révéler infranchissable en permanence pour tous les individus. Il peut être partiel et n'être infranchissable que pour certains individus et peut être également temporaire, c'est à dire totalement infranchissable à certaines périodes de l'année.

Il convient de ne pas sous-estimer l'impact négatif des obstacles temporaires qui retardent les poissons dans leur migration et peuvent les obliger à stationner dans des zones peu propices et/ou provoquer des blessures et des mortalités à la suite de tentatives de franchissement répétées et infructueuses.

Les obstacles peuvent créer des problèmes de franchissement :

- **à la montaison**, c'est à dire à la migration qui s'effectue en remontant les cours d'eau. Cette migration peut concerner par exemple les adultes d'espèces potamotoques (saumon atlantique, truite de mer, aloses, lamproies) ou d'espèces holobiotiques (brochet, ombre, truite commune...) avant la reproduction ou les juvéniles d'espèces thalassotoques (anguille au stade anguilette ou civelle) ;

- **à la dévalaison**, c'est à dire à la migration qui s'effectue en descendant les cours d'eau (vers la mer ou vers leur territoire de vie originel). Cette migration peut concerner i) les géniteurs d'espèces potamotoques ou holobiotiques qui après la reproduction cherchent à rejoindre leur territoire de vie originel, ii) les adultes d'espèces thalassotoques avant la reproduction comme les anguilles ou iii) les juvéniles d'espèces holobiotiques ou amphibiotiques qui dévalent en relation avec des phénomènes de compétitivité entre individus, de présence de prédateurs ou éventuellement de qualité physico-chimique des eaux (thermie, pollution...).

■ Barrières impactant la montaison

Il existe trois grands types d'ouvrages anthropiques transversaux sur les cours d'eau susceptibles d'impacter la libre circulation piscicole à la montaison : les seuils, les barrages et les ouvrages routiers.

Les seuils en rivière

Les seuils en rivière sont des ouvrages fixes (Figure 9) ou mobiles (Figure 10), qui barrent tout ou partie du lit mineur d'un cours d'eau (définition du SANDRE, 2008). Ils sont généralement d'une hauteur inférieure à 5 m (soit la hauteur des berges des plus grands cours d'eau). Leur nombre en France est estimé actuellement à plus de 70 000 (source : ROE 2013).

Les plus anciens ouvrages remontent généralement au Moyen Âge avec le développement de forges et de moulins.

Dès le 19^e siècle, l'essor industriel a multiplié la création ou la modification d'ouvrages pour alimenter en eau des industries afin de produire de l'énergie (vapeur) ou refroidir des systèmes d'exploitation. A cette même époque, l'État a initié une politique de stabilisation des versants dans tous les massifs montagneux de France afin de lutter principalement contre les risques d'inondations et de laves torrentielles dans les villes et villages situés à l'exutoire des bassins versants instables et productifs en charge solide. Les services de Restauration des Terrains de Montagne de l'Office National des Forêts ont implanté ainsi des milliers d'ouvrages de seuils en bois, en maçonnerie ou en béton.

De plus, les extractions massives de matériaux alluvionnaires dans les lits des cours d'eau menées dans les années 1960 - 1970 se sont traduites par un impact considérable sur l'équilibre des cours d'eau. Ainsi, pour limiter l'incision des cours d'eau ou pour conforter des ouvrages d'art existants (ponts, seuils...), un grand nombre de seuils de stabilisation en enrochements a été installé en complément.

D'après un inventaire national réalisé par l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema), **la très grande majorité des seuils dont la vocation initiale était l'utilisation de la force hydraulique ont aujourd'hui perdu tout usage économique.**

D'autres, créant une chute notable, et installés sur des cours d'eau à hydrologie conséquente, ont vu leur vocation initiale modifiée et sont aujourd'hui équipés de turbines hydroélectriques.

Selon les caractéristiques physiques de l'ouvrage (hauteur, profil, pente et longueur du coursier... pour la géométrie ; béton, enrochements... pour la nature des matériaux constructifs) et en fonction de l'hydrologie du cours d'eau, les conditions hydrauliques (vitesses d'écoulement, tirant d'eau, chute...) en amont, en aval ou au droit de l'ouvrage peuvent être totalement incompatibles avec les capacités de franchissement des poissons.

En fonction de la configuration du parement, il est possible de rencontrer :

■ **soit des chutes verticales ou quasi-verticales que le poisson ne peut franchir qu'en sautant (Figures 9a).**

Les déversements au-dessus des seuils à parement vertical ou quasi-vertical génèrent des nappes d'eau plongeantes pouvant empêcher tout franchissement d'espèces non sauteuses ou des espèces sauteuses dès lors que la chute est supérieure à leur capacité de saut ;

■ **soit des parements inclinés que le poisson est susceptible de franchir par la nage (Figure 9def).** Le degré de franchissabilité¹ d'un seuil incliné dépend des caractéristiques de l'écoulement sur le coursier (tirants d'eau, vitesses) et de la distance à franchir (directement fonction de la pente du coursier et de la hauteur de l'ouvrage) qui doivent être mises en relation avec les capacités de nage des espèces ciblées (vitesse de nage U_{max} et endurance à cette vitesse maximale) et leurs caractéristiques morphologiques (hauteur du poisson et de sa nageoire caudale assurant sa propulsion...);

■ **soit des configurations mixtes comportant une succession de parties en pente et de parties plus ou moins verticales (redans...) (Figure 9bc).** Un redan (ou redent) est un décrochement dans le parement du seuil venant briser de façon très marquée la continuité du profil du seuil. La présence d'un ou plusieurs redans sur un seuil (seuil en escalier, présence d'une rehausse en crête de seuil...), en particulier en condition de bas débit, peut considérablement dégrader les conditions de franchissement d'un seuil.

Figure

9



a © Chanseau - Onema

1- Le terme "franchissabilité" est un néologisme couramment utilisé pour définir le caractère plus ou moins franchissable d'un obstacle par des organismes vivants, et en particulier par les poissons. Le franchissement est l'action que réalise un organisme pour franchir un obstacle, alors que la franchissabilité est la qualité propre d'un obstacle à être franchi ou non. Les auteurs ont choisi d'utiliser le terme "franchissabilité" qui est aujourd'hui pleinement entré dans le langage technique de l'hydro-écologie.



b



c



d



e



f

b, e © Larinier - Pôle écohydraulique
d © Chanseau - Onema
c, f © Burgun - Onema

Exemples de seuils fixes.
(a) Seuil vertical, (b) seuil présentant une succession de redans, (c) seuil incliné présentant un redan en amont, (d) seuil incliné, (e) seuil en enrochements à faible pente, (f) seuil en enrochements à forte pente.

Les écoulements au niveau de seuils équipés d'organes mobiles (vannes, clapets) peuvent être très variables suivant le débit du cours d'eau, la gestion et la nature de ces organes mobiles (Figure 10).

Les déversements sur les clapets (Figure 10d) génèrent généralement des chutes verticales ou quasi verticales, que les poissons ne peuvent franchir que par le saut.

Pour d'autres ouvrages comme notamment les vannages, le débit peut transiter soit par surverse au-dessus de la vanne (Figure 10ac), soit en sousverse par-dessous la vanne lorsque celle-ci est partiellement levée. Les vitesses d'écoulement sous la vanne peuvent alors devenir incompatibles avec les capacités de nage des poissons.

Figure 10



a © Voegtli - Ecogea
b © Burgun - Onema
c © Bouchard - Onema
d © Voegtli - Ecogea

Exemples de seuils mobiles. (a) Ouvrage constitué d'une vanne levante avec écoulement par surverse et en sousverse (seuil de La Vilette à Louviers sur l'Eure), (b) ouvrage à aiguilles (Robertsau à Strasbourg sur l'Ille), (c) seuil constitué d'une série de vannes levantes (vannages du camping d'Autun sur le Ternin), (d) seuil constitué d'un clapet déversant (seuil de Probert sur le courant de Ste Eulalie).

Les barrages

Contrairement aux seuils, les barrages (Figure 11) obstruent une grande partie du fond de vallée, soit bien plus que le simple lit mineur. Ces ouvrages présentent généralement une forte hauteur supérieure à 5 mètres.

Suivant la topographie de la vallée et la nature du sol, les barrages ont été construits en béton, en terre, en enrochements ou partiellement avec chacun de ces matériaux.

Parmi les principaux types de barrages, on distingue le barrage poids (Figure 11a), le barrage à voûte (Figure 11b) simple ou multiples, le barrage poids-voûte, le barrage à contreforts, le barrage en remblais (SANDRE, 2008).

Leur vocation est assez variable. Ils peuvent être destinés à réguler le débit du cours d'eau et/ou à stocker l'eau pour différents usages : hydroélectricité, réserve d'eau potable, contrôle des crues, irrigation, industrie, activités de loisirs (nautisme, baignade...) etc.

Ces ouvrages de par leur hauteur sont totalement infranchissables pour l'ensemble des espèces.

Figure 11



a © Voegtlié - Ecogea
b © Baudoin - Onema

(a) Exemple de barrage poids (Barrage d'Eau Potable d'Apremont), (b) exemple de barrage voûte (barrage de Bimont dans les Bouches-du-Rhône, 87 mètres de hauteur).

Les ouvrages routiers, autoroutiers et ferroviaires

Les ouvrages de rétablissement des écoulements naturels sous les routes, autoroutes et voies ferrées (Figure 12) peuvent constituer des obstacles sérieux à la migration des poissons vers l'amont.

Dès que la pente devient notable, l'écoulement peut subir une accélération brutale et compte tenu de la faible rugosité de ces ouvrages, lorsqu'ils sont constitués de buses (Figure 12c) ou dalots béton (Figures 12 ad), les vitesses peuvent atteindre rapidement des valeurs importantes et incompatibles avec les capacités de nage des poissons. Dans les ouvrages constitués de buses ou dalots, l'uniformité des vitesses exclut souvent toute zone de repos pour le poisson qui doit alors franchir l'ouvrage d'un seul trait. L'effort demandé excède souvent ses capacités de nage.

Parallèlement, les profondeurs d'eau dans ces ouvrages peuvent devenir très faibles en particulier en période de basses eaux (étiage), rendant la nage et la progression du poisson difficile.

L'obscurité des ouvrages ou plutôt le changement brusque d'intensité lumineuse peut également provoquer chez certaines espèces une réticence à pénétrer dans l'ouvrage.

Figure 12



a, c, d © Voegtlié - Ecogea
b © Larrier - Onema

(a) Exemple de passage routier muni de dalots, (b) exemple de passage routier présentant un radier avec enrochements, (c) passage routier muni de buses, (d) passage routier muni de dalots.

■ Barrières impactant la dévalaison

Les ouvrages (que ce soit avec ou sans prélèvement d'eau) peuvent constituer des obstacles sérieux à la migration de dévalaison des juvéniles ou des adultes : transit par les déversoirs et les turbines hydroélectriques, entraînement dans les prises d'eau potable ou agricole.

Le passage par les déversoirs, évacuateurs de crues ou chutes naturelles

Le passage par les déversoirs, évacuateurs de crues ou chutes naturelles (Figure 13 ab) peut entraîner des mortalités directes (blessures, chocs...) ou indirectes (sensibilité à la prédation sur des individus choqués, désorientés). Les études menées sur plusieurs sites à l'étranger, notamment sur le saumon semblent montrer que les mortalités sont très variables d'un site à l'autre en fonction notamment de la hauteur de chute, de la présence d'une fosse de dissipation suffisamment profonde en pied, de possibilités de chocs sur des radiers, rochers...

Lors du franchissement d'un déversoir ou d'une chute naturelle (Figure 13), les individus dévalants sont susceptibles suivant la configuration des écoulements et le débit, de chuter :

■ **soit en chute libre** : Les poissons se trouvent en situation de chute libre (en dehors de la lame d'eau), et atteignent à partir d'une certaine hauteur de chute, une vitesse limite fonction notamment de leurs tailles et de leurs morphologies. Des expérimentations ont montré clairement que des dommages significatifs apparaissent sur les poissons dès lors que la vitesse d'impact du poisson sur le plan d'eau dépasse 15-16 m/s et ce quelle que soit la taille (Bell et Delacy, 1972 ; Larinier et Travade, 2002).

Ainsi, et à condition qu'une fosse de réception soit suffisante, les poissons de taille inférieure à 10-15 cm ne subissent globalement aucun dommage particulier quelle que soit la hauteur de chute, cette vitesse critique n'étant jamais atteinte.

Pour les poissons de tailles plus conséquentes, les dommages restent minimes tant que la chute est inférieure à 30 m pour des poissons de l'ordre de 15-20 cm ou tant que la chute est inférieure à une douzaine de mètres pour les individus de taille supérieure à 60 cm.

■ **soit dans la lame d'eau** : Lorsqu'un poisson dévalant chute en restant confiné à l'intérieur de la lame d'eau, sa survie serait identique à celle résultant d'une chute libre induisant la même vitesse d'impact au niveau du plan d'eau et ce à condition que la fosse de réception en pied assure un matelas d'eau suffisant. La vitesse d'impact "V" peut s'apprécier globalement par la formule suivante : $V = (2 \times 9.81 \times DH)^{0.5}$ avec DH, la hauteur de chute.

Figure 13



a © Baudoin - Onema
b © Voegtje - Ecogea
c © Archimbaud - Istea

Exemples de passages possibles de poissons dévalants par entraînement dans des déversoirs (b et c) ou des chutes naturelles (a).

Une lame d'eau atteint cette vitesse critique de l'ordre de 16 m/s à partir de 13 m de chute environ. Au dessus de cette hauteur de chute, les dommages sur les poissons deviennent significatifs. Les mortalités augmentent rapidement pour être totales au bout d'une cinquantaine de mètres (vitesse d'impact de l'ordre de 30 m/s).

Ainsi, pour les petits individus (alevins, poissons de taille inférieure à 15-20 cm), il est préférable de tomber en chute libre. Tandis que pour les plus gros individus, les effets seront très proches (limite de chute vers 12-13 m environ) que la chute se fasse au sein ou en dehors de la lame d'eau.

Entraînement dans les prises d'eau

Du fait de leur comportement migratoire les incitant à suivre le courant principal, les migrateurs en avalaison sont susceptibles de se laisser entraîner au niveau des prises d'eau d'ouvrages détournant tout ou partie du débit d'un cours d'eau (Figure 14).

Les prises d'eau peuvent être liées à différents usages (Figures 14 abc) comme l'alimentation en eau potable, l'irrigation, le refroidissement de machines industrielles ou de générateurs nucléaires, la production piscicole (étang, pisciculture) ou la production d'électricité (centrale hydroélectrique).

Dans certains cas (irrigation, eau potable notamment), l'eau prélevée n'est pas restituée au cours d'eau et les dommages varient fortement selon les débits prélevés et les possibilités de retour des poissons vers le cours d'eau.

Dans le cas des centrales hydroélectriques, l'eau prélevée est ensuite rejetée dans le cours d'eau après avoir été turbinée. Le passage à travers les turbines hydrauliques soumet cependant les individus dévalants à diverses contraintes susceptibles d'entraîner des dommages importants : risques de chocs contre les parties fixes et mobiles des turbines, accélérations et décélérations brutales, variations très brutales de pression.

Diverses études menées en France comme à l'étranger, montrent clairement que les mortalités sont très variables en fonction des caractéristiques des turbines, de l'espèce et de la taille des individus (Larinier et Dartiguelongue, 1989).

Figure 14



a © Larinier - pôle échohydraulique
b, c © Voegtli - Ecogea

Exemples de prises d'eau liées à différents usages. (a) Production d'électricité, (b) alimentation en eau potable et (c) pisciculture.

Principaux impacts sur les communautés de poissons induits par les problématiques de franchissement

Les obstacles physiques (chute et barrage, turbine hydroélectrique, zone de vitesse de courant excessive, absence ou manque d'eau) présents sur un axe ou un réseau fluvial peuvent perturber plus ou moins gravement le bon déroulement des déplacements longitudinaux et latéraux des poissons et donc leurs accès à la diversité des habitats nécessaires à la réalisation des différentes fonctions biologiques qui y sont associées, avec comme résultat la régression, voire l'extinction des populations concernées (Ovidio et Philippart, 2002).

■ Effets démographiques directs de la limitation de l'accès aux zones de reproduction

Le blocage plus ou moins important de la remontée des poissons lors de leur migration de reproduction peut entraîner une suppression partielle voire totale de l'accès aux frayères, avec pour conséquence, différents types d'impacts démographiques.

Chez les migrateurs amphihalins, cela peut se traduire par une diminution des abondances voire une disparition des espèces dans le cas où aucun site de reproduction fonctionnel n'est accessible.

Chez les espèces holobiotiques potamodromes, la réduction du nombre de reproducteurs atteignant les frayères situées sur l'amont des cours d'eau ou sur des affluents peut entraîner une réduction du recrutement des jeunes dans les bassins et sous-bassins concernés. Une diminution du peuplement est alors observée sur les parties de cours d'eau situées en aval des obstacles et alimentées par dérive des jeunes stades.

Dans les cours d'eau ou parties de cours d'eau ayant été affectés par une mortalité massive de poissons (pollution toxique, sécheresse, épizootie) ou connaissant un déficit chronique de reproduction (mauvaise qualité de l'eau et/ou des substrats de ponte), la présence d'obstacles physiques peut freiner la recolonisation naturelle des secteurs dépeuplés de l'amont par des poissons venant d'un réservoir de population à l'aval (cours principal par rapport à un affluent, partie basse d'un affluent par rapport à la partie haute). De tels effets ont été observés dans plusieurs cours d'eau pour les espèces sauvages de cyprinidés rhéophiles (barbeau, hotu, vandoise, chevaine, spirin) très sensibles aux effets des pollutions et qui ne bénéficient que très rarement de repeuplements de « reconstitution-réintroduction » en amont des obstacles. La fragmentation du milieu empêche également l'accès à des zones refuges en cas de perturbation de l'environnement (notamment dans le cadre du réchauffement climatique) et limite donc la capacité d'adaptation des espèces et augmente les risques d'extinction.

■ Effets génétiques

Le blocage ou le retard à la migration des poissons vers leurs zones de reproduction peut limiter les flux de gènes et avoir des conséquences sur les populations piscicoles.

Lorsqu'un obstacle est totalement infranchissable, et dans la mesure où l'habitat est encore favorable à l'espèce, il peut se produire une différenciation génétique des populations locales présentes à l'amont ou sur un affluent, surtout si l'isolement est ancien et qu'il n'y a pas eu de repeuplement.

De même, si l'habitat est dégradé, la capacité d'accueil faible ou si l'obstacle est partiellement franchissable, il peut y avoir un appauvrissement de l'apport de gènes et donc une perte de diversité génétique. Néanmoins, l'impact réel sur les populations (perte de la capacité d'adaptation, augmentation de la sensibilité aux pathogènes) reste difficile à établir scientifiquement. Il est également possible que les obstacles exercent des effets de sélection en ne permettant le passage qu'à certains individus de la population (sexe, taille, performances individuelles de nage et de saut, périodicité de la migration).

L'influence des obstacles sur la génétique des populations de poissons risque surtout de se manifester chez les espèces effectuant des migrations de reproduction vers l'amont puisque dans ce cas, l'obstacle infranchissable empêche la transmission de l'information génétique vers l'amont. Mais chez les espèces de petites tailles, aux mœurs benthiques, présentes dans les têtes de bassins et apparemment plus sédentaires au stade adulte, on peut supposer que c'est surtout la dévalaison-dispersion vers l'aval (des jeunes et des adultes) qui va jouer dans les processus de recolonisation de secteurs de l'aval dépeuplés par un événement de mortalité massive. Dans un tel cas, le blocage par piégeage (dans la retenue d'un barrage ou dans un étang) ou la mortalité (par passage dans des turbines hydroélectriques, pompes...) influencent directement la diversité génétique des populations en aval.

■ Retards à la migration et mortalités par épuisement

L'impact cumulé sur les axes fragmentés par un grand nombre d'ouvrages peut s'avérer conséquent et ce même dans le cas où aucun obstacle majeur n'est identifié (Chanseau et Larinier, 1999 ; Ovidio et Philippart, 2002 ; Thorstad *et al.*, 2005 dans Croze, 2008).

Les pertes induites par une succession d'ouvrages sont liées non seulement au nombre de poissons qui ne parviennent pas à franchir l'ensemble des obstacles situés en aval des premières frayères mais aussi à l'épuisement lié au cumul des délais nécessaires à leur franchissement (tentatives de saut ou/et recherche active de voies de passages). Ainsi, à la montaison, même si le poisson parvient finalement à atteindre une frayère potentielle, la reproduction peut se révéler inefficace si l'arrivée est trop tardive, notamment parce que les conditions environnementales ne sont plus propices à une bonne survie des œufs ou parce que l'énergie dépensée par l'individu en migration a entraîné un phénomène d'épuisement qui l'empêche de défendre un territoire ou d'éviter les prédateurs.

En dévalaison, les retards occasionnés par les obstacles sont surtout préjudiciables aux grands migrateurs qui peuvent avoir à franchir un nombre important d'ouvrages et dont les périodes de migrations vers l'aval sont plus ciblées dans le temps (notamment pour le saumon atlantique). Ces périodes parfois courtes doivent leur permettre de regagner la mer dans un délai raisonnable et dans des conditions environnementales adéquates.

Pour les espèces holobiotiques qui effectuent un homing post-reproducteur, le retard occasionné est probablement moins dommageable pour les populations en place puisque des habitats de substitution peuvent éventuellement être utilisés avant le retour vers les aires de croissances (Ovidio *et al.*, 2007).

■ Blessures et mortalités au niveau des ouvrages

Ce type d'impact concerne plus spécifiquement la migration de dévalaison (c'est à dire la migration qui s'effectue en descendant les cours d'eau) au niveau d'ouvrages de prise d'eau plutôt qu'à la migration de montaison, même si des blessures ou des mortalités de poissons peuvent survenir suite à des tentatives de saut (voir précédemment).

La migration de dévalaison peut concerner différents stades biologiques suivant les espèces concernées, à savoir notamment :

- les juvéniles des espèces amphibiotiques anadromes (saumon atlantique, truite de mer, aloses, lamproies...);
- les adultes d'espèces amphibiotiques anadromes ayant survécu après la reproduction (salmonidés, alose feinte...);
- les adultes d'espèces amphibiotiques catadromes avant la reproduction (anguille);
- les juvéniles ou les adultes d'espèces holobiotiques potamodromes après la reproduction (truite commune, barbeau fluviatile...).

Au niveau d'un ouvrage présentant une prise d'eau, une partie des poissons dévalant transite par les ouvrages évacuateurs (déversoirs, vannes, clapets...) et une autre est entraînée vers la prise d'eau. Cette proportion varie en fonction de la configuration de l'ouvrage et de la fraction du débit total du cours d'eau prélevée.

De manière générale, la dévalaison des poissons par les déversoirs de barrages est rarement dommageable, en particulier dans le cas des barrages de hauteur modérée (moins d'une dizaine de mètres) et lorsque la profondeur de fosse en pied de chute est suffisante (matelas d'eau suffisant pour une bonne réception).

Les dommages peuvent être assez variables selon les ouvrages. Dans le cas de prélèvements d'eau sans retour du débit prélevé au cours d'eau (irrigation, eau potable, industries...), les mortalités sur les poissons ayant emprunté la prise d'eau peuvent être totales dans le cas particulier où aucun dispositif n'est installé visant à empêcher ou limiter le passage des poissons.

Dans le cas des centrales hydroélectriques, les dommages sont variables selon les espèces et la taille des individus (Larinier et Dartiguelongue, 1989 ; Larinier et Travade, 2002) et dépendent en particulier du débit d'équipement des ouvrages, de leur configuration et des caractéristiques des turbines.

Attention. Le problème des impacts cumulés des obstacles est là aussi particulièrement important et peut dans certains cas entraîner des taux de mortalité incompatibles avec le maintien ou la restauration des populations de migrateurs.

■ Augmentation des risques de prédation et de maladies

En augmentant le temps de résidence des poissons dans des secteurs ne présentant pas des caractéristiques, notamment physico-chimiques, optimales ou en entraînant un épuisement accéléré des poissons, les obstacles sont susceptibles de favoriser la prédation par l'avifaune, les poissons piscivores ou les braconniers.

En outre, le stress, la fatigue et les blessures occasionnés par les prédateurs ou les tentatives de sauts répétés rendent les poissons fragiles et beaucoup plus sensibles aux parasites et aux maladies.

De même, lors de la migration de dévalaison, les poissons blessés ou stressés notamment après une chute importante ou un passage à travers une turbine hydroélectrique sont vulnérables et peuvent devenir plus sensibles à la prédation.

Les capacités de franchissement des poissons

Les différents modes de franchissement

Au cours de leur migration de montaison, les poissons rencontrent des obstacles physiques artificiels et/ou naturels dont le franchissement est plus ou moins possible. Les possibilités de franchissement d'un obstacle sont étroitement liées :

- aux comportements migratoires et aux capacités de nage et de saut associées des espèces considérées ;
- à la configuration et aux caractéristiques hydrauliques de l'obstacle.

Les capacités de nage et de saut sont fortement liées à la morphologie des poissons et à leurs capacités biomécaniques qui sont elles-mêmes fortement conditionnées par l'écologie de l'espèce considérée et par les types de milieux dans lesquels elles vivent ou transitent au cours de leur cycle biologique. Les capacités de franchissement sont généralement influencées par différents facteurs mésologiques (qualité physico-chimique et thermique de l'eau) et physiologiques des individus (état de maturité sexuelle, état de santé général).

Si la nage est un mode de franchissement évident pour les poissons (Figure 15a), seules certaines espèces de nos cours d'eau (saumon atlantique, truite de mer, truite commune, mulot et ombre commun) sont réellement capables de franchir un obstacle en sautant (Figure 15b), et à la condition notamment que le poisson trouve au pied de l'obstacle des conditions favorables lui permettant de prendre son appel.

Par sa morphologie particulière et par ses capacités de respiration cutanée, l'anguille est capable de se déplacer également par reptation (Figure 15c), à la condition toutefois que le support reste humidifié. C'est grâce à ce mode de déplacement particulier que l'anguille arrive ponctuellement à coloniser certains bassins versants fortement aménagés. Elle reste un cas atypique de nos cours d'eau et sera traitée de manière spécifique dans le cadre du protocole ICE.

Figure 15



Exemples de modes de franchissement de poissons.

a © Dugenay - Association L'Hydroscope
b © Borda - Onema
c © DDTM 40

Les activités de nage

■ Les différents niveaux d'activités et la notion d'endurance

La **capacité de nage** des poissons peut s'exprimer en termes de vitesse de nage et d'endurance, temps pendant lequel le poisson peut soutenir cette vitesse de nage. Plusieurs niveaux d'activités de nage sont distingués chez les poissons (Beach, 1984) :

■ **l'activité de croisière**, susceptible d'être maintenue pendant des heures sans engendrer de modifications physiologiques profondes de l'organisme du poisson ;

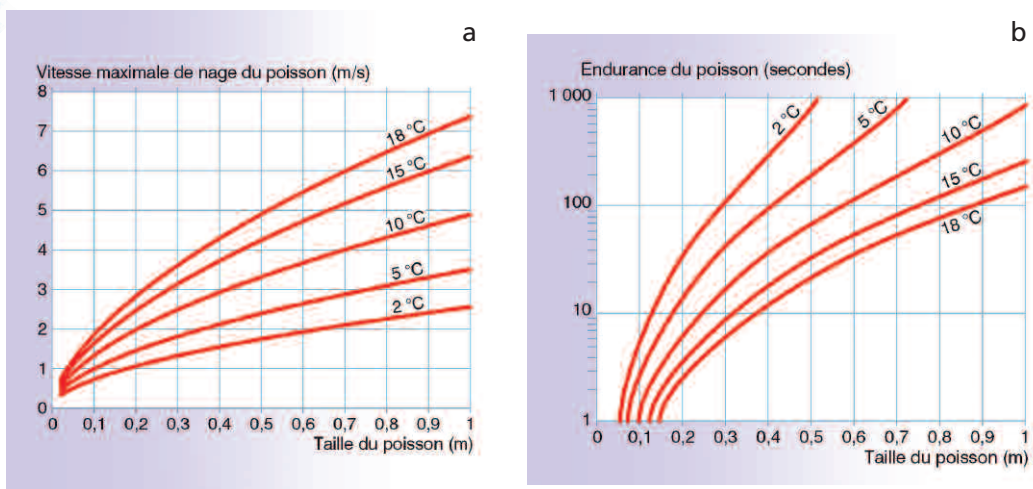
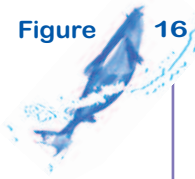
■ **l'activité de sprint ou de pointe**, résulte d'un effort intense et ne peut être maintenue qu'un temps très limité, de quelques secondes à quelques dizaines de secondes suivant l'espèce et la taille de l'individu.

Entre ces deux niveaux d'activité de nage se trouve **l'activité soutenue** qui peut être maintenue pendant plusieurs minutes voire dizaine de minutes, mais entraînant à terme la fatigue du poisson. La durée possible de l'effort est d'autant plus brève que la vitesse de nage est importante et proche de la vitesse de pointe.

L'endurance t_U , est le temps durant lequel un poisson peut nager à une certaine vitesse U . Elle dépend de la réserve en glycogène stockée dans les muscles. Cette réserve est utilisée dès que le poisson dépasse sa vitesse de croisière et le rythme de déplétion est fonction de la vitesse de nage et de la température. L'endurance doit être prise comme une durée d'effort maximale provoquant l'épuisement total du poisson. **L'endurance à vitesse maximale est, selon les auteurs, de l'ordre de 10 à 20 secondes.**

L'endurance et la vitesse maximale de nage dépendent avant tout de la **longueur du poisson**, de sa **morphologie** (relation poids-longueur, pourcentage de masse musculaire) et de la **température** (Beach, 1984 ; Zhou, 1982 ; Wardle, 1980) (Figure 16).

Figure 16



(a) Vitesse maximale de nage en fonction de la taille du poisson et de la température pour les salmonidés, (b) Endurance à la vitesse maximale de nage en fonction de la taille du poisson et de la température pour les salmonidés. Adapté de Beach 1984.

La **taille du poisson** est le facteur prépondérant déterminant la vitesse de nage. Videler (1993) propose une équation, basée sur la compilation de résultats expérimentaux, donnant la vitesse maximale de nage (U_{max}) en fonction de la longueur du poisson (L_p). Cette équation a l'avantage d'intégrer les résultats d'études réalisées sur différentes espèces et dans des conditions expérimentales variées. Elle permet ainsi de donner une valeur fiable de vitesse de nage, basée sur des fondements objectifs.

$$U_{max} = 0,4 + 7,4 L_p$$

La vitesse de nage est souvent exprimée en longueur du corps du poisson par seconde (L_p/s). L'expression de Videler (1993) peut aussi s'exprimer sous la forme suivante :

$$U_{max}/L_p = 0,4/L_p + 7,4$$

NB Dans le cadre du protocole ICE, les vitesses de nage associées U_{max} ont été déterminées à partir des formules de Videler (1993) données ci-dessus, mais aussi d'études expérimentales ciblées sur le franchissement et d'observations visuelles de poissons lors de franchissement d'obstacles.

Le tableau 1 reprend par espèce, les classes de tailles retenues pour des poissons adultes ou en approche de la maturité sexuelle (sauf pour l'anguille qui colonise nos cours d'eau à des stades plus juvéniles).

La gamme de taille ($L_{p_{min}}$ - $L_{p_{max}}$) a été définie à partir notamment de la Banque de Données des Milieux Aquatiques et des Poissons (BDMAP) de l'Onema, des données récupérées sur le site Internet spécialisé Fishbase et des données de l'atlas des poissons d'eau douce de France (Keith *et al.* 2011). $L_{p_{min}}$ et $L_{p_{max}}$ représentant respectivement les tailles minimales et maximales retenues. $L_{p_{moy}}$ représente la moyenne entre les deux valeurs extrêmes précédentes.

Tableau

1

Tailles retenues pour des poissons adultes ou en approche de maturité sexuelle (L_p) selon les espèces.

Espèces	Tailles des poissons L_p (cm)		
	$L_{p_{min}}$	$L_{p_{moy}}$	$L_{p_{max}}$
Able de Heckel (<i>Leucaspis delineatus</i>)	5	8	10
Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>)	5	10	15
Ablette sprirlin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>)	10	14	17
Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	30	40	50
Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	6	9	12
Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	12	26	40
Apron (<i>Zingel asper</i>)	10	15	20
Aspe (<i>Aspius aspius</i>)	50	63	75
Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)	30	55	80
Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>)	10	18	25
Blageon (<i>Telestes souffia</i>)	10	18	25
Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>)	5	8	10
Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>)	15	28	40
Brème commune (<i>Abramis brama</i>)	20	40	60
Brochet (<i>Esox lucius</i>)	40	70	100
Carassin (<i>Carassius carassius</i>)	15	23	30
Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>)	10	20	30
Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	30	58	85
Chabots (<i>Cottus</i> sp)	5	10	15
Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>)	20	45	70
Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>)	5	8	10
Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>)	5	8	10
Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>)	10	23	35
Goujons (<i>Gobio</i> sp)	5	13	20
Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	45	58	70
Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>)	5	13	20
Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	25	40	55
Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>)	25	35	45
Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>)	10	15	20
Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	30	38	45
Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)	60	75	90
Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)	5	10	15
Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>)	5	10	15
Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>)	30	45	60
Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	25	43	60
Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	30	40	50
Perche (<i>Perca fluviatilis</i>)	15	30	45
Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)	10	23	35
Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)	30	60	90
Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	50	75	100
Tanche (<i>Tinca tinca</i>)	20	40	60
Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	10	18	25
Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	50	75	100
Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	15	23	30
Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	25	40	55
Vairons (<i>Phoxinus</i> sp)	5	8	10
Vandoises (<i>Leuciscus</i> sp hors <i>Idus</i>)	15	25	35

■ Tirant d'eau minimum

Pour permettre au poisson d'utiliser ses pleines capacités de nage, il est nécessaire que le tirant d'eau soit suffisant pour lui permettre d'assurer sa propulsion par l'ondulation de son corps et les mouvements de sa nageoire caudale. Cette lame d'eau minimale est liée à la taille du poisson et à sa morphologie. Les rapports de forme (rapport hauteur/longueur du poisson) à l'exception des espèces anguilliformes, peuvent varier d'environ 0,17 (salmonidés) à 0,30 (brème, carpe).

Dans la littérature, il est souvent mentionné une lame d'eau minimale comprise entre 1 à 2 fois la hauteur du poisson. Il est parfois préconisé jusqu'à 2,5 fois la hauteur de la nageoire caudale, notamment dans le domaine du dimensionnement de passes à poissons.

NB Dans le cadre du protocole ICE, il a été considéré que le tirant d'eau minimal nécessaire pour permettre à l'espèce (ou au groupe d'espèces) de nager était voisin de 1,5 fois la hauteur « moyenne » $h_{p_{moy}}$ des individus de l'espèce et du stade de développement concernés (ou du groupe d'espèces). La hauteur des individus a été appréciée à partir du facteur de forme de chaque espèce (Figure 17).

Figure 17

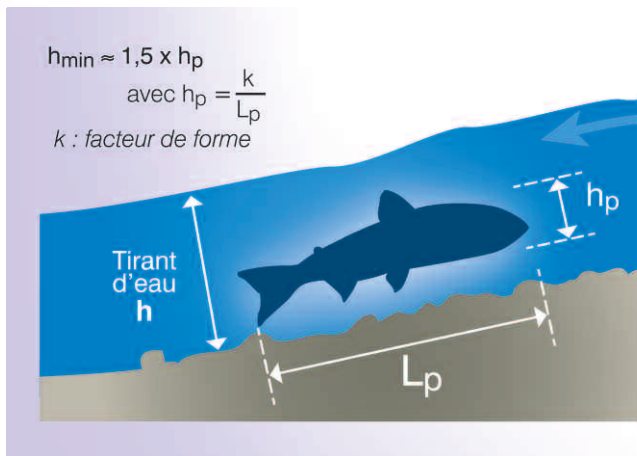


Schéma représentant le tirant d'eau considéré comme le minimum nécessaire pour qu'un poisson puisse nager convenablement.

Ainsi, à titre d'exemple, la hauteur minimale d'eau (h_{min}) pouvant être retenue est de l'ordre de 20 cm pour les grands salmonidés migrateurs et de l'ordre de 5 cm pour les petites truites communes ($L_p < 30$ cm).

Attention. Les valeurs retenues pour les tirants d'eau sont à prendre comme des valeurs extrêmes permettant un franchissement potentiel. Dans les passes à poissons, des valeurs nettement plus importantes sont systématiquement adoptées (2 à 2,5 fois la hauteur des individus).

Le franchissement par saut

■ Les capacités de saut

Seules certaines espèces (saumon atlantique, truite de mer, truite de rivière, mulot et ombre commun) utilisent fréquemment leurs capacités de saut pour franchir un obstacle (Figure 18a).

D'autres espèces (Figure 18b) ont des facultés à sauter (vandoise, barbeau...) mais ce comportement reste très anecdotique, notamment dans le cas de franchissement d'obstacles.

Figure 18



a © Borda - Onema
b © Burgun - Onema

Poissons tentant de franchir un obstacle par saut. (a) Saumon atlantique, (b) gros cyprinidé (ce comportement de saut reste très anecdotique pour ces espèces).

Le mouvement du poisson effectuant un saut peut être assimilé à la trajectoire parabolique d'un projectile. Ainsi, l'équation de la trajectoire peut s'exprimer sous la forme :

$$X = (U_{\max} \cos\beta) t$$

$$Y = (U_{\max} \sin\beta) t - 0,5 g t^2$$

où :

X et Y sont respectivement les distances horizontales et verticales parcourues par le projectile (en l'occurrence le poisson dans notre cas) au temps t.

U_{\max} la vitesse initiale, c'est à dire la vitesse de sprint du poisson,

β l'angle d'incidence avec le plan horizontal et g l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2).

La hauteur maximale (Y_{\max}) atteinte par le poisson dépend de sa vitesse initiale U_{\max} et de l'incidence β du saut au départ :

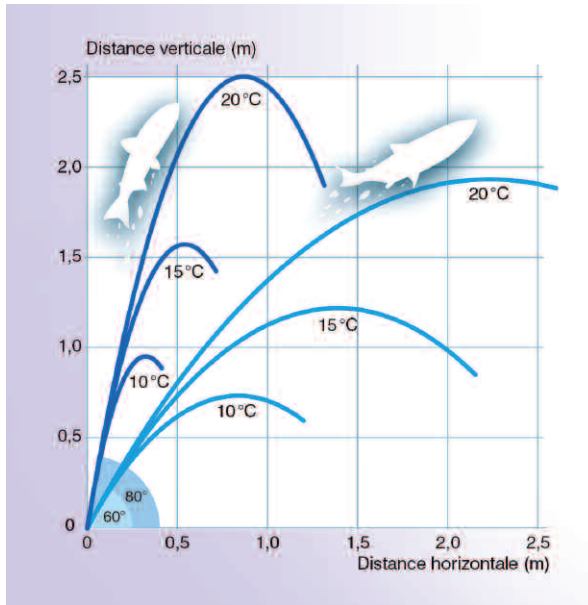
$$Y_{\max} = (U_{\max} \sin\beta)^2 / 2 g$$

La distance horizontale (X_{\max}) correspondant à cette hauteur maximale est donnée par l'expression :

$$X_{\max} = U_{\max}^2 \cos\beta \sin\beta / g$$

Les trajectoires théoriques de saut d'un saumon de 0,8 m de longueur ont été représentées en fonction de la température de l'eau et de l'angle d'incidence du saut (Figure 19). Ce graphique met en évidence le rôle prépondérant de la température et de l'angle d'incidence sur la hauteur franchissable par le saut.

Figure 19



Trajectoires théoriques de saut pour un saumon de 0,8 m de longueur en fonction de la température et de l'angle d'incidence. D'après Larinier et al., 1998.

En toute rigueur, il conviendrait d'ajouter à cette hauteur de chute Y_{max} une hauteur correspondant à une certaine fraction de la longueur du poisson dans la mesure où celui-ci utilise sa force propulsive jusqu'au moment où sa nageoire caudale quitte la surface de l'eau (Powers et Osborne, 1985).

De plus, l'équation précédente ne tient pas compte de la composante ascendante de la vitesse existant au pied d'une chute, que le poisson peut utiliser. Les valeurs de saut obtenues par les formules fournies ci-dessus sont donc des valeurs minimales.

A titre d'exemple, le tableau 2 ci-dessous représente schématiquement l'évolution de la hauteur de saut d'un poisson d'une longueur donnée et de sa vitesse initiale U_{max} (établie à partir de la longueur du poisson selon la formule de Videler) en fonction de l'angle d'incidence du saut (40°, 60° et 80°) et de la fraction de la longueur L_p du poisson (0, $L_p/2$ ou L_p) rajoutée à la hauteur théorique Y_{max} de saut.

Tableau 2

Evolution de la hauteur de saut d'un poisson d'une longueur donnée et de sa vitesse initiale U_{max} (établie à partir de la longueur du poisson selon la formule de Videler) en fonction de l'angle d'incidence du saut et de la fraction de la longueur L_p du poisson rajoutée à la hauteur théorique Y_{max} de saut.

Vitesse de sprint U_{max} (m/s)	Longueur du poisson (L_p) associé d'après Videler (m)	Hauteur de saut = Y_{max} (m)			Hauteur de saut = $Y_{max} + L_p/2$ (m)			Hauteur de saut = $Y_{max} + L_p$ (m)		
		Angle d'incidence du saut (β)			Angle d'incidence du saut (β)			Angle d'incidence du saut (β)		
		80°	60°	40°	80°	60°	40°	80°	60°	40°
7,0	0,90	2,4	1,9	1,0	2,9	2,3	1,5	3,3	2,8	1,9
6,5	0,80	2,1	1,6	0,9	2,5	2,0	1,3	2,9	2,4	1,7
6,0	0,75	1,8	1,4	0,8	2,2	1,8	1,1	2,5	2,1	1,5
5,5	0,70	1,5	1,2	0,6	1,8	1,5	1,0	2,2	1,8	1,3
5,0	0,60	1,2	1,0	0,5	1,5	1,3	0,8	1,9	1,6	1,1
4,5	0,55	1,0	0,8	0,4	1,3	1,1	0,7	1,6	1,3	1,0
4,0	0,50	0,8	0,6	0,3	1,0	0,9	0,6	1,3	1,1	0,8
3,5	0,40	0,6	0,5	0,3	0,8	0,7	0,5	1,0	0,9	0,7
3,0	0,35	0,4	0,3	0,2	0,6	0,5	0,4	0,8	0,7	0,5
2,5	0,30	0,3	0,2	0,1	0,5	0,4	0,3	0,6	0,5	0,4
2,0	0,20	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3
1,5	0,15	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2

Des observations portant sur plusieurs espèces de salmonidés (Lauritzen *et al.* 2005 et 2010) montrent que l'incidence de saut la plus fréquente est de l'ordre de 60°.

NB Dans le cadre de ce protocole ICE, on retiendra globalement une incidence de 60° et une hauteur de saut des poissons équivalente à $Y_{\max} + L_p/2$.

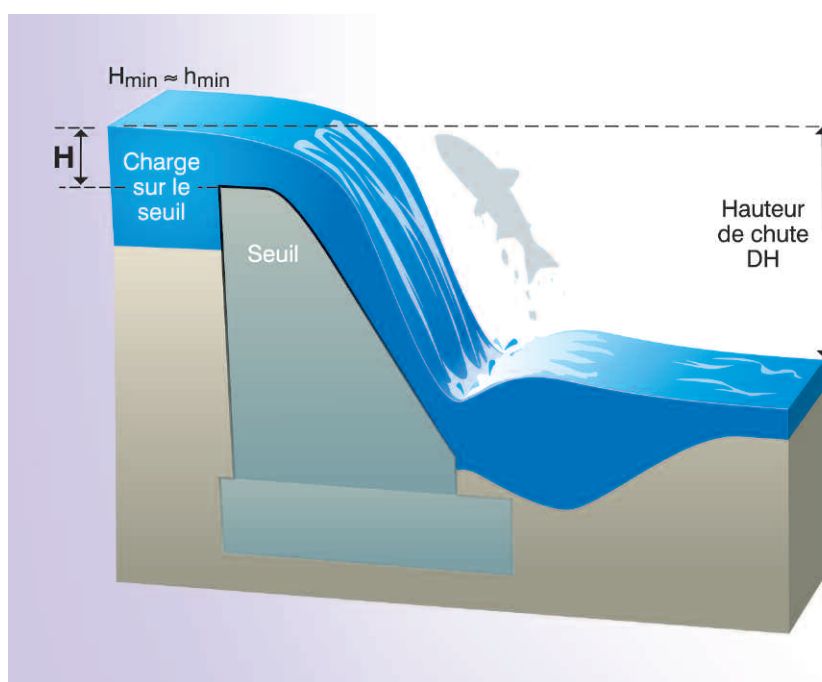
■ Charge minimale sur l'obstacle

Pour le franchissement par saut, il est nécessaire que la lame d'eau sur le déversoir (seuil, chute naturelle) soit suffisante pour permettre au poisson de reprendre une nage efficace dès sa réception. Ceci est particulièrement important lorsque la chute est importante et que le poisson retombe sur la crête de l'ouvrage. Sur les petites chutes bien inférieures aux capacités de saut des poissons, la distance horizontale parcourue par le poisson lui permet généralement de tomber directement dans la retenue amont, dans une zone assez profonde et présentant des vitesses d'écoulement réduites compatibles avec une reprise de nage des individus.

Une charge suffisante sur l'obstacle permet également de créer une chute marquée permettant d'assurer un jet suffisamment attractif pour le poisson.

NB Dans le cadre du protocole ICE, il a été considéré que la charge minimale nécessaire (H_{\min}) était équivalente à la profondeur d'eau minimale (h_{\min}) permettant la nage du poisson (Figure 20).

Figure 20



Charge minimale nécessaire (H_{\min}) sur un obstacle pour garantir le saut des espèces sauteuses et une réception suffisante pour permettre le passage en amont.

Attention. Ces valeurs retenues pour les charges sont à prendre comme des valeurs extrêmes permettant un franchissement potentiel. C'est pourquoi, dans les passes à poissons, des valeurs nettement plus importantes sont systématiquement adoptées.

Notions de fosse d'appel en aval de la chute

Le franchissement d'un ouvrage par saut ou par nage demande au poisson un effort intense l'obligeant généralement à faire appel à sa vitesse de sprint. Il est donc impératif qu'il existe à l'aval immédiat de l'ouvrage une zone suffisamment calme et profonde afin de permettre au poisson une prise d'appel correcte (Figure 21bd).

Au pied d'un obstacle, l'impact du jet sur le substratum provoque une fosse où se dissipe l'énergie créée par la chute et le débit du cours d'eau. Des expérimentations (Veronese, 1937 ; Fahlbusch, 1994) ont montré que les profondeurs d'affouillement (H_f) étaient liées au débit unitaire q (débit par mètre de largeur), à l'incidence α du jet (ou ici la pente du coursier par rapport à l'horizontale) et dans une moindre mesure à la hauteur de chute DH :

$$H_f = 1,88 q^{0,5} DH^{0,25} (\sin \alpha)^{0,5}$$

A débit unitaire et à chute équivalents, la profondeur de fosse augmente avec la pente, et est maximale pour une chute verticale ou subverticale. Par contre, notamment au niveau de certains obstacles artificiels, la fosse peut être réduite voire totalement absente lorsque par exemple, des blocs d'enrochements ont été déversés en aval de l'ouvrage pour éviter l'affouillement du seuil, ou lorsque l'ouvrage a été construit sur un substratum rocheux (Figure 21ac).

Figure 21



a © Voegtli - Ecogea
b © Voegtli - Ecogea
c © Bouchard - Onema
d © Voegtli - Ecogea

Exemples de fosses en aval d'ouvrages. (a) et (c) Fosses insuffisantes, (b) et (d) fosses suffisantes.

Cette notion de fosse d'appel minimale pour le poisson est difficile à apprécier car elle est liée à la taille et aux capacités de nage du poisson et à la manière dont se dissipe le jet à l'aval.

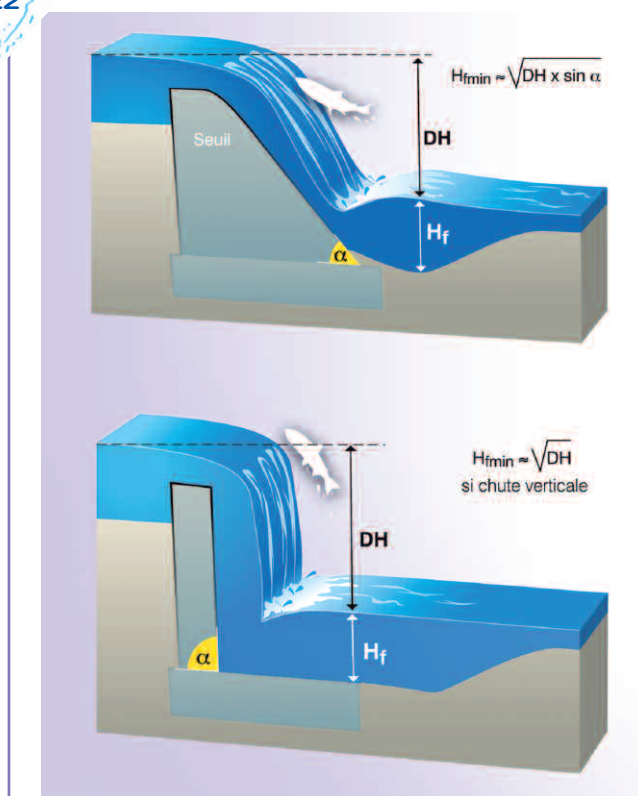
Dans la littérature, les critères donnés sur les profondeurs de fosses minimales sont très variables. Pour les auteurs prenant en compte la longueur du poisson, il est souvent mentionné une profondeur minimale de la fosse correspondant à 1 à 2 fois la longueur du poisson (Meixler et al. 2009). Ce critère n'intègre pas du tout de notion d'hydraulique et de dissipation d'énergie de la chute. Ainsi, pour une même espèce et quelle que soit la

hauteur de chute, la profondeur minimale nécessaire reste constante. Ce critère a tendance à proposer des valeurs de fosses nécessaires beaucoup trop importantes pour les petites chutes. A titre d'exemple, pour une fosse minimale égale à 2 fois la longueur du poisson, un saumon de 75 cm aurait besoin d'une profondeur d'environ 1,5 à 2 m pour franchir une chute de 0,50 m, ce qui est bien au-delà des profondeurs de fosse nécessaires.

D'autres auteurs préconisent une profondeur minimale correspondant à 1 à 2 fois la hauteur de chute (Lauritzen *et al.*, 2010 ; Stuart, 1962). Ne prenant en compte ni le débit unitaire, ni l'incidence du jet, ces critères ont par contre tendance à donner des valeurs de fosses nécessaires beaucoup trop importantes pour des chutes supérieures à 1 m (respectivement 1,5 et 3 mètres pour une chute de 1,5 m).

NB Dans le cas de la présente démarche ICE, il a été décidé d'apprécier l'ordre de grandeur de la profondeur de fosse utile par une formule faisant intervenir à la fois la chute et la pente du coursier (Figure 22) comme les formules de Veronese (1937) et Fahlbusch (1994) tout en excluant volontairement le débit unitaire, élément trop difficile à intégrer dans le protocole : $H_f \geq \sqrt{DH \sin \alpha}$

Figure 22



Ordre de grandeur de la profondeur de fosse nécessaire pour permettre au poisson de franchir un obstacle (saut ou nage) dans des conditions satisfaisantes.

Si la profondeur de fosse constatée en pied de chute est nettement inférieure à la valeur calculée par la formule allégée précédente, on pourra alors généralement considérer que les turbulences en pied de seuil sont trop importantes et que le poisson ne sera pas dans des conditions optimales pour effectuer un appel suffisant pour franchir l'ouvrage par saut ou nage.

La profondeur de fosse utile est à prendre suffisamment près de la chute notamment lorsque le poisson doit faire appel à ces capacités de saut. En effet, les observations visuelles de poissons montrent globalement que la majorité des tentatives de saut au niveau de chutes se situent relativement proche du point de contact de la chute avec le plan d'eau aval.

NB Aussi, dans le cadre du protocole ICE, on considère que la profondeur de fosse utile doit être prise en compte à une distance voisine de 0,50 à 1,0 m de la chute, ce qui est en accord avec les observations et travaux menées par Lauritzen *et al.* (2005).

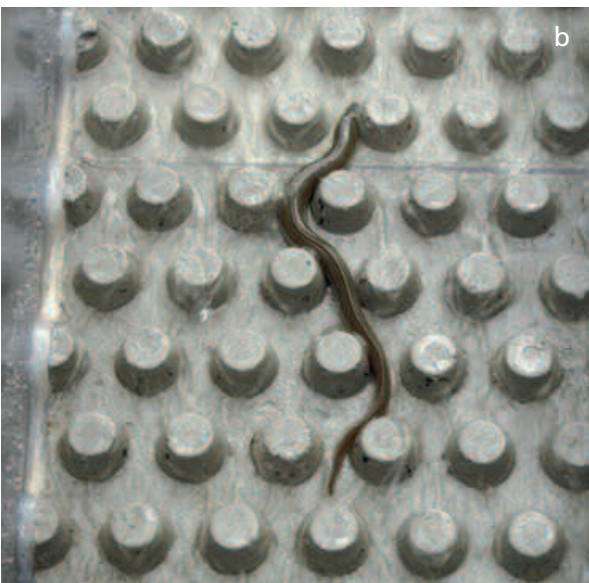
L'anguille, un cas particulier par ses capacités de reptation

En raison de sa morphologie et de son mode de propulsion, les performances natatoires de l'anguille sont beaucoup plus limitées que celles des autres espèces de la même taille.

Pour les civelles (juvéniles de 6-8 cm environ), les vitesses de nage maximales trouvées dans la littérature sont de l'ordre de 30 à 50 cm/s (Clough et Turnpenny, 2001 ; Tsukamoto *et al.* 1975). Pour des anguillettes d'une vingtaine de centimètres, elles sont de l'ordre de 1 à 1,5 m/s (Clough *et al.* 2002 ; Sörenson, 1951). Mc Leave (1980) a étudié les performances des civelles : la distance parcourue dans un écoulement de 0,30 m/s est voisine de 3 mètres et se réduit à une trentaine de centimètres avec un courant de 0,5 m/s. Cependant, de par sa morphologie particulière et par ses capacités de respiration cutanée, l'anguille est capable de se déplacer également par reptation (Figure 23), à la condition toutefois que le support reste humidifié. C'est par ce mode de déplacement que l'anguille arrive à coloniser certains étangs et à contourner certains obstacles.

Les plus petits individus sont capables de franchir « par escalade » des parois verticales sans avoir besoin d'appuis (Figures 23a). Ils semblent utiliser la force de tension superficielle créée au contact de leur corps avec la paroi humide pour se maintenir sur ces parois verticales (Legault, 1986 et 1987). Mais, au cours de sa croissance, le rapport poids/tension superficielle, proportionnel à leur longueur, augmente, ce qui explique que seuls les plus petits individus (de taille inférieure à une douzaine de cm environ) peuvent utiliser ce mode de progression. Nature du substrat, pente et alimentation du substrat (charge), en relation avec la taille des anguilles, sont des facteurs essentiels et souvent liés, déterminant les possibilités de franchissement de l'anguille. Pour que sa reptation soit performante, l'anguille doit pouvoir prendre appui en plusieurs points : l'efficacité de la reptation est alors liée à la densité des appuis en relation avec la taille des individus et à la disposition de ces appuis (Voegtli et Larinier, 2000) (Figure 23b).

Figure 23



a © Laharanne - Fdaappma 33
b © Larinier - Pôle écohydraulique

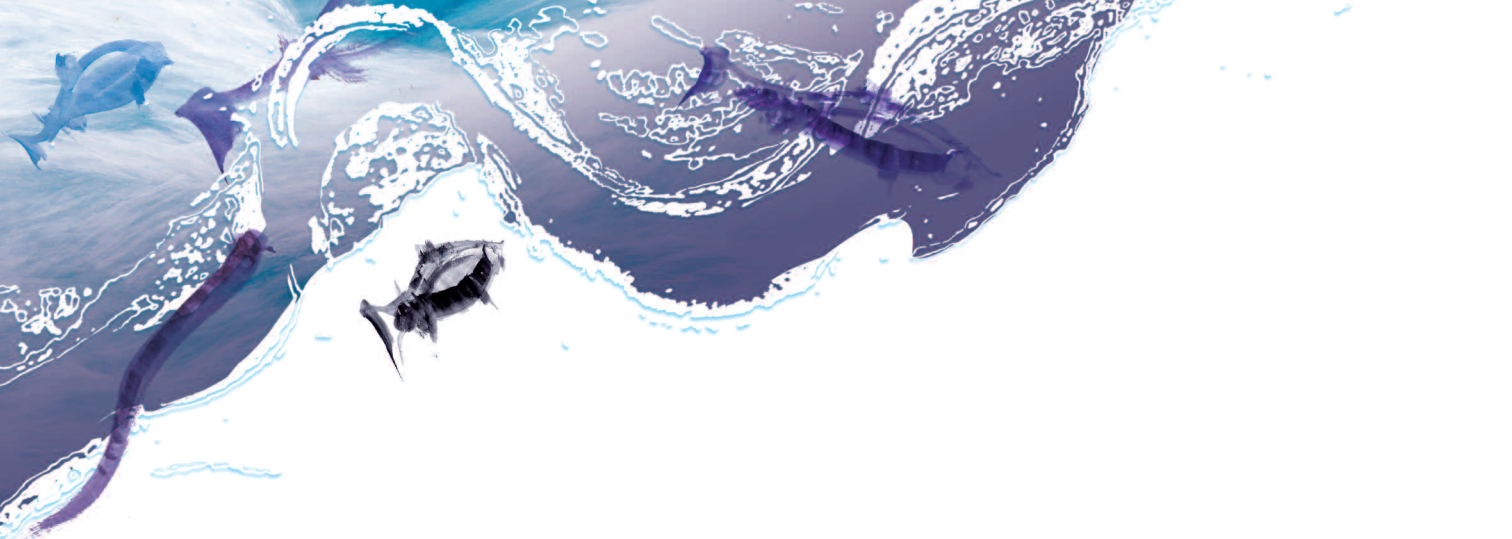
(a) Très jeunes stades d'anguilles en montaison sur des parois verticales. Elles utilisent ici la tension superficielle et les « micro » rugosités du substrat, (b) anguille jaune en migration sur un substrat de reptation adapté et offrant un nombre d'appuis suffisant.

Principes généraux du protocole ICE

44 ■ La démarche du protocole

52 ■ Définition des groupes d'espèces

71 ■ Définition des classes de franchissabilité



La démarche du protocole

Le principe du protocole et ses limites

L'objectif du protocole ICE consiste à diagnostiquer l'état de franchissabilité d'un obstacle par l'ichtyofaune de manière objective, en évitant au maximum le recours à l'expertise.

Cette méthodologie est applicable par une équipe restreinte d'opérateurs (2 à 3 personnes) et en un **temps limité** (généralement moins de 2 heures).

Attention. Une restriction concerne toutefois la migration de dévalaison. En effet, au regard de la complexité des mécanismes de dévalaison et de la nécessité d'avoir une bonne connaissance de l'hydrologie, des modalités de prélèvement et des caractéristiques hydromécaniques des installations, aucuns critères simples et synthétiques n'ont été définis pour appréhender la franchissabilité des ouvrages à la dévalaison. Ainsi, **l'appréciation de l'impact potentiel d'une prise d'eau sur la dévalaison nécessitera toujours une expertise spécifique par des techniciens spécialisés.**

Le protocole ICE s'attachera essentiellement au diagnostic de l'état de franchissabilité d'un ouvrage pour des espèces en montaison. Lors de sa mise en oeuvre, un recueil de données de terrain utiles à l'expertise de la dévalaison sera tout de même effectué.

Le diagnostic des discontinuités à la montaison dans le cadre du protocole ICE doit permettre de définir facilement l'état de franchissabilité d'un ouvrage, selon des **classes définies** et pour une espèce ou un **groupe d'espèces** considéré.

Le concept du protocole ICE repose sur la confrontation de la typologie et géométrie des obstacles et des conditions hydrauliques au niveau des ouvrages avec les capacités physiques de déplacement des espèces de poissons considérées.

Ainsi, dans son principe général, le protocole consiste à **identifier sur chaque obstacle la ou les voies potentielles de passage**, d'en décrire les caractéristiques géométriques et les conditions hydrauliques, et de les confronter aux capacités physiques des espèces ciblées, comme suggéré par Ovidio *et al.* (2007).

La description des caractéristiques géométriques de chaque partie potentielle de passage de poissons (Figure 24 ab) sera principalement réalisée en relevant les différents profils en long correspondants.

La logique de description est donc de relever les cotes altimétriques de chaque point singulier de l'ouvrage correspondant à des modifications significatives dans le profil (par exemple la rupture de pente). Ces cotes sont

relevées selon l'écoulement, du fond du cours d'eau à l'amont immédiat de l'obstacle jusqu'à la fosse d'appel à l'aval de l'ouvrage (Figure 25). Le levé de l'altimétrie de ces points et de la distance entre points permet ainsi d'établir un ou plusieurs profils en long schématiques des voies potentielles de passage pour le poisson.

Figure 24

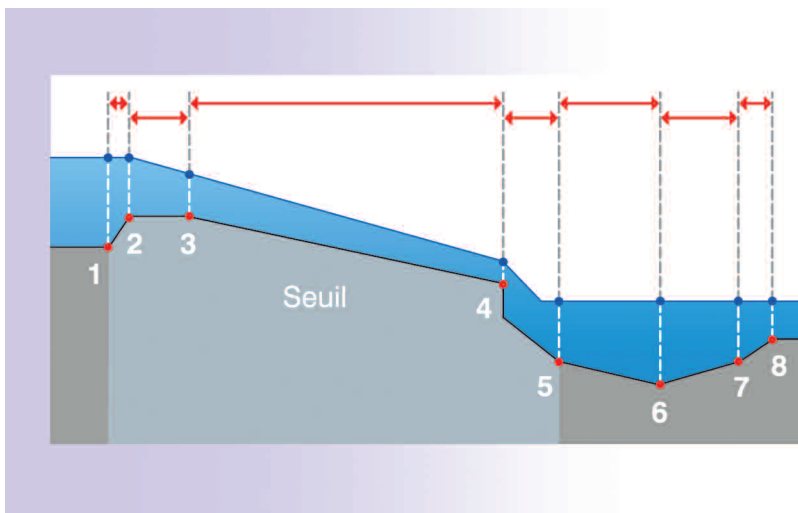


a, b © Burgun - Onema



Exemples de localisation de profils en long à réaliser pour caractériser un ouvrage.
 (a) Sur un tel ouvrage présentant trois vannages identiques et fermés, le levé d'un seul profil en long paraît suffisant, (b) dans le cas de ce seuil, il est utile d'effectuer un profil en long sur la partie hors d'eau, celle-ci pouvant être immergée à d'autres conditions hydrologiques.

Figure 25



Exemple de profil en long réalisé sur un ouvrage simple.

La franchissabilité d'un obstacle dépend avant tout des conditions hydrauliques présentes au niveau des différentes parties qui le composent, et face auxquelles les poissons seront confrontés (en fonction de leurs capacités de nage et de saut). Le levé des lignes d'eau tout au long de chaque profil réalisé est donc particulièrement important et doit être effectué simultanément à celui des caractéristiques purement physiques de l'ouvrage. Ces conditions hydrauliques sont fonctions non seulement du type d'ouvrage (parement uniformément incliné, parement aval en escalier, obstacles verticaux fixes ou mobiles, passages busés, présence d'écoulement sous vannes...) et de sa géométrie (hauteur, profil, pente, longueur, rugosité), mais aussi des débits qui y transitent. Ces derniers dépendent quant à eux des conditions hydrologiques en période de migration qui peuvent s'avérer très variables.

La franchissabilité peut donc évoluer avec le débit du cours d'eau ; l'ouvrage pouvant être très impactant en étiage et totalement effacé en période de hautes eaux (Figure 26).

Aussi, lors d'un diagnostic ICE, il conviendra de se placer dans la mesure du possible dans les conditions hydrologiques les plus représentatives de la période de migration des espèces ciblées.

Cela peut rendre très difficiles et périlleuses pour l'opérateur certaines mesures structurelles importantes de l'ouvrage, empêchant ainsi de pouvoir juger son état de franchissabilité.

A contrario, si les conditions d'étiage permettent facilement d'accéder aux ouvrages et de mesurer leurs différentes composantes structurelles, elles peuvent s'avérer très pénalisantes sur le diagnostic de franchissabilité (chute maximale, tirant d'eau plus faible, fosse d'appel de profondeur plus faible...) alors qu'elles sont peu représentatives des conditions les plus fréquentes rencontrées en période de migration.

Ainsi, plusieurs visites sur site pour différentes conditions hydrologiques (basses eaux et eaux moyennes) s'avèreront souvent nécessaires afin de définir ou affiner les classes de franchissabilité ICE. Lorsqu'un diagnostic est réalisé dans des conditions hydrologiques peu représentatives de celles rencontrées par une espèce en période de migration, il est donc conseillé, en complément de l'analyse classique, d'apprécier la classe de franchissabilité en ignorant les paramètres déclassant liés au débit, qui sont le plus souvent le tirant d'eau et la charge. Cette analyse effectuée sans prise en compte des critères liés au débit permet d'apprécier la sensibilité de la franchissabilité de l'ouvrage à l'hydrologie et permet également de juger de l'utilité de revenir sur site pour d'autres conditions hydrologiques.

Lorsque plusieurs voies de passage ont été diagnostiquées au niveau d'un obstacle, ces voies peuvent avoir des degrés de franchissabilité différents. Ainsi sur un même obstacle, des voies peuvent être considérées au sens du protocole ICE comme infranchissables et d'autres comme totalement franchissables. Pour que les voies diagnostiquées comme " franchissables " puissent être réellement efficaces, il est nécessaire que les poissons les trouvent. Cela peut se révéler très problématique lorsque ces voies ne représentent par exemple qu'une très faible largeur comparée à celle de l'obstacle et/ou ne sont alimentées que par une fraction infime et peu attractive du débit total transitant par l'ouvrage.

Le protocole ICE ne permet pas, en présence de voies multiples, de se prononcer sur le degré d'attractivité de chacune d'entre elles. Aussi, dans ce cas de figure, la définition de la classe de franchissabilité ICE globale de l'obstacle devra s'appuyer sur un bon niveau d'expertise. Cela passera le plus souvent par l'acquisition préalable d'une bonne connaissance de la répartition des débits au niveau du site étudié en fonction de l'hydrologie.

Dans le cadre du protocole ICE, la caractérisation des conditions hydrauliques dans ou sur les ouvrages a été volontairement et fortement simplifiée.

Dans le cas où des analyses plus précises doivent être conduites, il conviendra alors de réaliser une modélisation hydraulique spécifique du site. Elle permettra ainsi de mieux caractériser les conditions hydrauliques au niveau de l'ouvrage selon les débits du cours d'eau, pour les mettre ensuite en relation avec les capacités de franchissement des espèces.

Figure 26



a, b © Steinbach - Onema
c, d © Chanseau - Onema
e, f © Burgun - Onema

Exemples d'ouvrages à différentes conditions de débit. A gauche (a) (c) (e) basses eaux. A droite (b) (d) (f) hautes eaux.

Cette modélisation hydraulique détaillée devra alors passer par la construction et le calage d'un modèle numérique à partir d'un certain nombre de données physiques (géométrie précise de l'ouvrage, rugosités) et hydrauliques (débits, conditions aux limites aval et amont en fonction des débits...).

A titre d'exemple, il existe des logiciels gratuits qui peuvent permettre de telles analyses, à savoir notamment :

- le logiciel *FishXing* développé notamment par *USDA-Forest Service Pacific Northwest Research Station*. Ce logiciel téléchargeable sur le site Internet (<http://stream.fs.fed.us/fishxing/>) a été conçu initialement pour analyser le franchissement des poissons au travers d'ouvrages routiers mais il peut être utilisé de manière plus générale pour modéliser notamment des seuils simples ;
- le logiciel *HEC-RAS* développé par *US Army Corps of Engineers*, téléchargeable à l'adresse Internet <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hecras-download.html> est quant à lui un logiciel plus adapté pour modéliser les conditions hydrauliques sur ou dans des ouvrages quelconques. En revanche, il ne fait pas le lien avec les capacités de nage des poissons comme *FishXing*. Cette analyse entre l'hydraulique et la biologie doit donc être faite en parallèle. Ce logiciel est très utilisé par les bureaux d'études spécialisés en écohydraulique ou en hydraulique fluviale. Il a d'ailleurs été utilisé pour définir plusieurs critères de diagnostic du présent protocole ICE.

Les différents types d'obstacles traités dans le cadre du diagnostic à la montaison

Dans le cadre du diagnostic à la montaison, les principaux types d'obstacles traités sont les suivants :

- les ouvrages (seuils et barrages) constitués uniquement de parties fixes ;
- les ouvrages présentant des organes mobiles partiellement ou totalement ouverts ;
- les ouvrages routiers, autoroutiers ou ferroviaires ;
- les ouvrages mixtes, plus complexes et constitués d'éléments de nature différente ;
- les ouvrages estuariens.

Différents critères ont été définis pour diagnostiquer la franchissabilité de chacun de ces types d'obstacles pour les principales espèces de poissons de France métropolitaine. Les prochains chapitres s'articulent donc autour de cette notion de typologie d'obstacles, en déclinant pour chacun d'eux les critères à évaluer et la procédure de diagnostic. Un chapitre spécifique est toutefois dédié à l'anguille afin de prendre pleinement en compte ses capacités de franchissement particulières.

Attention. Certains obstacles sont équipés de dispositifs de franchissement piscicole. Dans le cadre du protocole ICE, un pré-diagnostic de ces équipements peut être réalisé en conditions normales d'exploitation (débit d'alimentation et entretien). Il vise à identifier rapidement les dispositifs assurément non adaptés aux espèces concernées et pour lesquels un diagnostic plus poussé pourra s'avérer nécessaire. Il ne s'agit toutefois en aucun cas d'un protocole de diagnostic approfondi du fonctionnement hydraulique du dispositif, ni d'une procédure de contrôle de conformité au sens réglementaire du terme.

Le diagnostic des obstacles à la dévalaison : recours à l'expertise

■ Problématique générale

La migration de dévalaison, c'est à dire la migration de l'amont vers l'aval, peut concerner différents stades biologiques suivant les espèces ciblées, à savoir notamment :

- les juvéniles des espèces potamotoques (saumon atlantique, truite de mer, truite commune, alose...);
- les adultes d'espèces potamotoques après la reproduction (salmonidés, alose feinte...);
- les adultes d'espèces thalassotoques avant la reproduction (anguille).

Au cours de sa migration de dévalaison, le poisson peut être confronté à divers problèmes au niveau des ouvrages : modification de la qualité des eaux, exposition aux prédateurs dans les retenues, retard de migration, chute lors du transit par les déversoirs et évacuateurs de crues, transit dans les turbines des centrales hydroélectriques, entraînement dans les prises d'eau industrielles ou agricoles avec éventuellement passage au travers de systèmes de pompes, etc.

■ Dispositifs permettant de limiter les impacts

Différentes solutions techniques ont été testées plus ou moins récemment, principalement en Europe et en Amérique du Nord, pour éviter ou limiter les dommages subis par les poissons au niveau des aménagements.

L'état de l'art technique et les retours d'expériences sont beaucoup plus avancés pour le smolt de saumon atlantique que pour les autres espèces, mais les études menées sur l'anguille depuis près d'une dizaine d'années permettent de disposer aujourd'hui de réels éléments techniques.

Parmi les principales solutions techniques généralement envisagées, on peut citer notamment :

- la mise en place de plans de grilles fines associés à un ou plusieurs exutoire(s) (Figures 27cd) ;
- l'arrêt des installations en période de migration ;
- l'installation de turbines ou pompes " ichtyocompatibles " n'induisant pas ou très peu de dommages (Figures 27ab).

De façon générale, l'efficacité des barrières comportementales (écrans lumineux, sonores, électriques, à bulles...) s'est révélée très décevante et ne permet pas en l'état actuel d'assurer des efficacités suffisantes.

Comme pour les dispositifs de franchissement dédiés à la montaison, les aménagements visant à garantir la dévalaison des espèces doivent être déterminés au cas par cas, être adaptés aux spécificités des installations et prendre en compte les caractéristiques morphologiques et les comportements migratoires des individus de l'espèce ou des espèces ciblées.

Figure 27



a, b, c, d © Ecogea

(a, b) Exemple de groupe turbogénérateur possédant des caractéristiques ichtyophiles, (c, d) prise d'eau dite ichtyocompatible (grille inclinée longitudinalement présentant des barreaux à faibles espacements et des exutoires de dévalaison en surface).

Pour plus de détails sur la conception et le dimensionnement d'installations visant à réduire les dommages à la dévalaison, le lecteur pourra se référer à des guides techniques, comme par exemple :

- Larinier M., Porcher J.P., Travade F., Gosset C. (1994). *Passes à poissons. Expertise, Conception des ouvrages de franchissement. Conseil Supérieur de la Pêche, Collection Mise au point.*
- Larinier M., Travade F., (1999). *La dévalaison des migrateurs : problèmes et dispositifs. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 353-354, 181-210.*
- Larinier M., Travade F. (2002). *Downstream Migration : Problems and Facilities. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture., 364 suppl : 181-207.*
- Travade F., Larinier M. (2006). *French experience in downstream migration devices. In: Free passage for Aquatic Fauna in rivers and other water bodies. International DWA-Symposium on water resources management. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, pp. 91-99. ISBN 978-3-939057-19-2.*
- Courret D., Larinier M. (2008). *Guide pour la conception de prises d'eau " ichtyocompatibles " pour les petites centrales hydroélectriques. Rapport ADEME – GHAAPPE.*

En outre, Chanseau et al. (2012) ont récemment rédigé une note synthétique, sur la base des connaissances techniques et biologiques actuelles, visant à expliciter le positionnement de la délégation interrégionale Sud-Ouest de l'Onema sur les solutions à mettre en place pour la dévalaison au niveau des prises d'eau des petits aménagements hydroélectriques, dès lors que la décision d'en réduire les impacts a été prise.

■ Expertise visant à diagnostiquer un ouvrage hydroélectrique

Appréciation des dommages potentiels au niveau d'un aménagement

Dans le cas d'un aménagement de dérivation hydroélectrique par exemple (Figure 28), en fonction des débits respectifs transitant par les ouvrages évacuateurs et dans le canal d'amenée, de la configuration du barrage et de l'ouvrage de prise d'eau, une partie des poissons dévalants transite par les ouvrages évacuateurs (déversoirs, vannes, clapets...) et l'autre est entraînée dans le canal d'amenée jusqu'à la centrale.

Figure 28

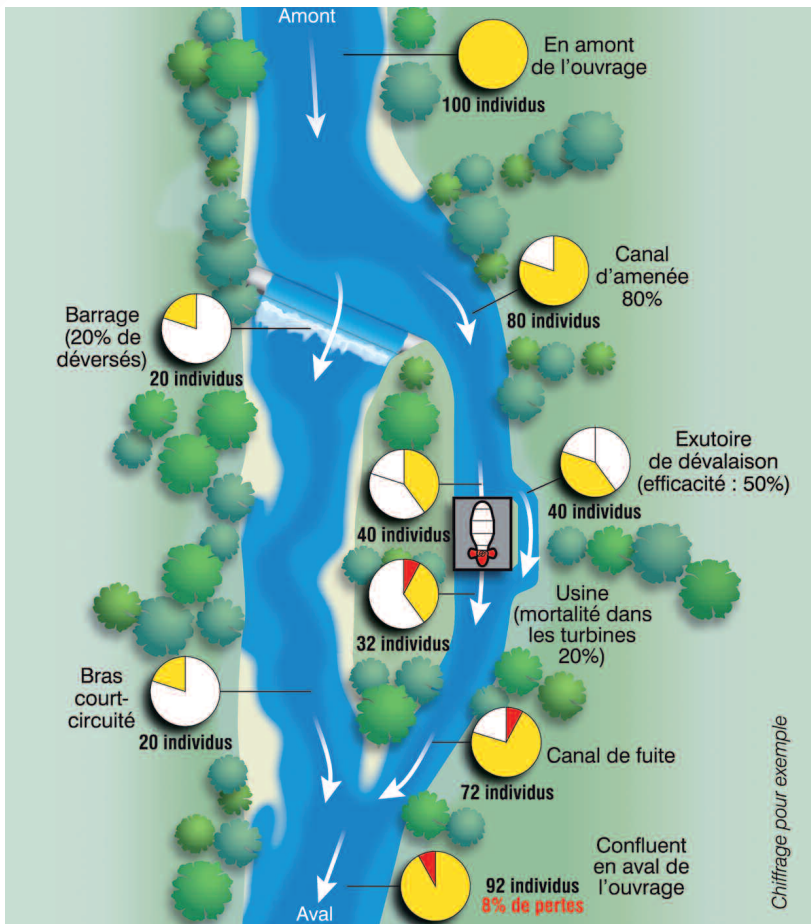


Schéma type d'un aménagement et principe de la modélisation du phénomène de dévalaison. D'après Voetgle et Larinier, 2004.

Lorsqu'un dispositif de franchissement permettant la dévalaison des poissons existe au niveau de la prise d'eau de la centrale, un certain pourcentage de poissons emprunte ce dispositif et rejoint sans dommage le cours d'eau, le reste transitant par les turbines de la centrale. Suivant les caractéristiques des turbines, ces individus subissent un pourcentage de mortalité plus ou moins important.

Les individus ayant survécu rejoignent ensuite ceux qui ont transités (le plus souvent sans dommage) par les ouvrages évacuateurs du barrage et/ou par le dispositif de dévalaison et continuent leur migration vers l'aval.

L'appréciation de l'impact potentiel d'une prise d'eau sur la dévalaison nécessite donc un certain degré d'expertise qui doit s'appuyer sur les différentes études réalisées mais aussi sur une bonne connaissance du fonctionnement des installations, de l'hydrologie du cours d'eau, et de la répartition des débits au droit du site.

L'appréciation de l'impact potentiel d'un ouvrage à la dévalaison suppose généralement de déterminer sur un site donné :

■ **la répartition des passages des poissons dévalants au niveau de la prise d'eau**, en fonction des débits en période de migration, du débit prélevé et de la configuration de l'aménagement (barrage, prise d'eau).

Des expérimentations menées sur plusieurs sites, notamment à l'aide de la technique de radiotélémétrie, ont permis de mieux connaître le comportement des poissons et notamment des smolts et des anguilles argentées en dévalaison, en particulier au niveau des barrages et des grilles de prises d'eau (Croze & Larinier, 1999 ; Croze *et al.*, 1999 et 2001 ; Chanseau *et al.*, 1999 et 2002 ; Travade *et al.*, 1999 et 2010 ; Bau *et al.*, 2008 et 2013) ;

■ **les dommages potentiels subis en fonction du type et des caractéristiques des installations hydromécaniques équipant l'aménagement** (turbines, pompes...). Des expérimentations ont été menées dans divers pays (Etats Unis, Canada, Suède, Ecosse, Allemagne, France) sur différentes espèces (principalement sur les juvéniles de salmonidés et sur l'anguille) afin d'évaluer les dommages, en termes de % de mortalité et de type de blessures, résultant du transit dans les différents types de turbines. Les résultats obtenus sont assez concordants et permettent de tirer certaines conclusions générales sur les dommages potentiels subis par les poissons. Des expressions donnant un ordre de grandeur des mortalités des poissons en fonction du type de turbine et de ses caractéristiques hydromécaniques (nombre de pales, vitesse de rotation, diamètre de la roue), de la hauteur de chute et de la taille du poisson ont été proposées, en particulier pour les juvéniles de salmonidés et pour les anguilles argentées (Larinier et Dartiguelongue, 1989 ; Gomes et Larinier, 2008) ;

■ **la perméabilité des grilles de prise d'eau** avant tout liée à leur espacement et de l'efficacité des exutoires de dévalaison lorsqu'ils existent et qu'ils sont ouverts.

Appréciation à l'échelle d'un axe ou d'un bassin

Au delà de l'estimation des mortalités potentielles au niveau de chaque ouvrage, il est également important, en particulier pour les migrateurs amphihalins, de les resituer à l'échelle de l'axe de migration, en prenant en compte la position géographique des ouvrages et les habitats en amont.

Des études visant à apprécier les dommages cumulés à l'échelle d'un axe ont été réalisées pour les smolts et pour l'anguille notamment sur le territoire Adour-Garonne (Bosc et Larinier, 2000 ; Pallo et Larinier, 2002 ; Voegtli et Larinier, 2004, 2008 ; Voegtli, 2010).

Toutes ces études considèrent toutefois que la répartition des poissons sur un territoire donné est en relation directe avec les quantités d'habitat disponibles. Dans la plupart des cas, les obstacles présents exercent également des impacts à la montaison, modifiant par la même la répartition " théorique " des individus.

Le référentiel RefMADI élaboré par l'Onema en liaison avec le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie propose un jeu de fiches méthodologiques synthétiques présentant la démarche de diagnostic appliquée à la dévalaison ou à la montaison à l'échelle d'un aménagement hydroélectrique. Des fiches spécifiques pour la dévalaison de l'anguille à l'échelle d'un axe et à l'échelle d'un ouvrage sont également consultables (téléchargement en ligne : <http://www.onema.fr/refmadi>).

Attention. Dans le cadre du protocole ICE, au regard de la complexité des mécanismes de dévalaison et de la nécessité d'avoir de bonnes connaissances de l'hydrologie du cours d'eau, des modalités de prélèvement et des caractéristiques hydromécaniques des installations, l'abandon d'une démarche diagnostique basée sur l'évaluation de critères simples s'est imposé. Pour appréhender la franchissabilité des ouvrages à la dévalaison, une expertise spécifique réalisée par des techniciens spécialisés demeure incontournable.



Définition des groupes d'espèces

Présentation des groupes d'espèces

Pour répondre aux objectifs du protocole ICE, les différentes espèces de poissons ont été regroupées en fonction de leur capacité de nage (essentiellement leur vitesse de pointe et les tirants d'eau minimum nécessaire à la nage) et de leur aptitude au saut. Ces caractéristiques sont les deux principaux traits biologiques qui vont influencer leur capacité à franchir des barrières physiques (voir la section consacrée aux capacités de franchissement des poissons). Il s'agit toutefois d'une approche simplifiée, qui regroupent parfois des espèces présentant une éco-éthologie et/ou une morphologie sensiblement différentes.

Seules les migrations de montaison associées à la reproduction (sauf pour l'anguille) ont été prises en compte, ces déplacements étant les plus particulièrement impactés par la fragmentation de l'habitat. Ainsi, en termes de capacités de franchissement, **les individus de taille adulte ou en approche de maturité sexuelle ont été plus particulièrement considérés** (sauf pour l'anguille qui colonise les cours d'eau à des stades plus juvéniles).

La classification des poissons en différents groupes ICE est décrite ci-après et présentée synthétiquement sous forme de tableaux en fin de cette section (Tableaux 3 et 4). Au final, **11 groupes d'espèces ont été définis** avec certaines subdivisions en sous-groupes.

NB L'anguille constitue à elle seule un groupe indépendant au vu de ses capacités de franchissement très différentes des autres espèces.

Pour chaque groupe ou sous-groupe ICE, les vitesses de nage associées U_{max} ont été déterminées à partir notamment des formules de Videler (1993), d'études expérimentales ciblées sur le franchissement et d'observations visuelles de poissons lors de franchissement d'obstacles.

Les tirants d'eau minimums nécessaires pour permettre au groupe d'espèces de nager ont été appréciés à partir du facteur de forme des individus et en considérant globalement une hauteur minimale d'eau (h_{min}) voisine de 1,5 fois la hauteur moyenne des individus (voir section relative aux capacités de franchissement des poissons dans la partie Continuité écologique et ichtyofaune).

NB La volonté a été de ne pas multiplier excessivement le nombre de groupes dans le cadre du protocole. Cependant, pour des cas particuliers qui nécessitent une approche plus ciblée sur une espèce donnée, il est possible de réaliser une expertise plus précise à l'aide d'outils plus sophistiqués.

Nombreuses de ces espèces sont susceptibles de se déplacer et de franchir des obstacles à un stade plus jeune (déplacements ontogénétiques). Des analyses sur le stade juvénile des différentes espèces sont possibles. Il conviendra alors de revoir à la baisse les vitesses de nage U_{max} et les tirants d'eau minimums h_{min} cités ultérieurement. Plus concrètement, il peut être alors plus facile de se rapporter aux valeurs fournies pour une espèce plus petite mais ayant une morphologie comparable (A titre d'exemple, on peut globalement considérer qu'un smolt de saumon atlantique aura des capacités de nage relativement proches de celles d'une truite commune de taille équivalente).

■ Premier groupe

Il est constitué des salmonidés migrateurs amphihalins anadromes (potamotoques) : le saumon atlantique (*Salmo salar*) (Figure 29a) et la truite de mer (*Salmo trutta*) (Figure 29b).

Figure 29



Exemples d'espèces du premier groupe. (a) Saumon atlantique, (b) truite de mer.

Ces deux espèces sont celles qui possèdent, au stade adulte, les plus grandes capacités de franchissement d'obstacles par saut et/ou nage.

Les poissons en migration sont généralement des poissons de grande taille pouvant varier de 50 cm à 100 cm suivant le nombre d'années passées en mer. Pour les truites de mer de plus petites tailles, il conviendra plutôt de se rapporter au groupe 4a (truite commune de taille comprise entre 25 et 55 cm).

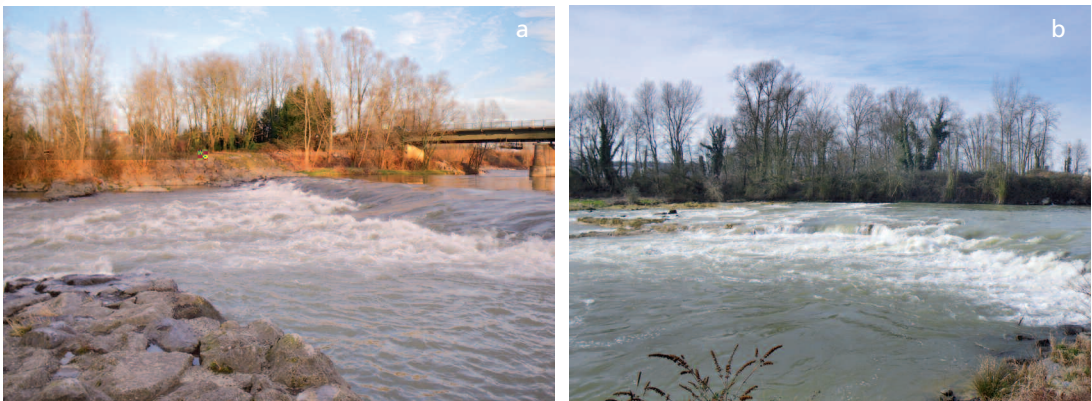
A contrario, pour les truites de lac qui présentent au stade adulte des tailles importantes, il est conseillé de se reporter à ce premier groupe plutôt qu'au quatrième groupe.

Pour ce premier groupe, il a été retenu **des vitesses de pointe U_{max} de l'ordre de 4,5 à 6,5 m/s** (vitesse moyenne de l'ordre de 5,5 m/s). Ceci est en accord avec les nombreuses références disponibles sur ces espèces (Kreitmann, 1932; Stuart, 1962; Bell, 1986 ; Booth *et al.*, 1997; Colavecchia *et al.*, 1998 ; Beach, 1984; Lauritzen *et al.* 2010).

Le saumon et la truite de mer sont d'excellents sauteurs. Les hauteurs de chute maximales pouvant être franchies par saut sont de l'ordre de 1,0 m à 2,5 m suivant la taille des individus dans le cas où le poisson bénéficie de conditions d'appel adaptées en aval (Figure 30ab).

Le tirant d'eau minimal (h_{min}) retenu pour assurer le passage des individus est de l'ordre de 20 cm.

Figure 30



Exemples d'obstacles franchis par des saumons atlantiques sur le Gave de Pau.

■ Deuxième groupe

Il est composé du mullet lippu (*Chelon labrosus*) et mullet porc (*Liza ramada*) qui sont des poissons migrateurs amphihalins catadromes thalassotoques (Figure 31). Après la migration des juvéniles de la mer (lieu de la reproduction) vers les eaux saumâtres ou douces, ils effectuent la plus grande partie de leur vie trophique dans les estuaires et les fleuves et dévalent au stade adulte pour la reproduction vers la mer (Liao, 1981 dans Gautier et Hussenot, 2005).

Figure 31



© Daufresne - Irstea

Exemple d'espèces du deuxième groupe.
Mulet porc.

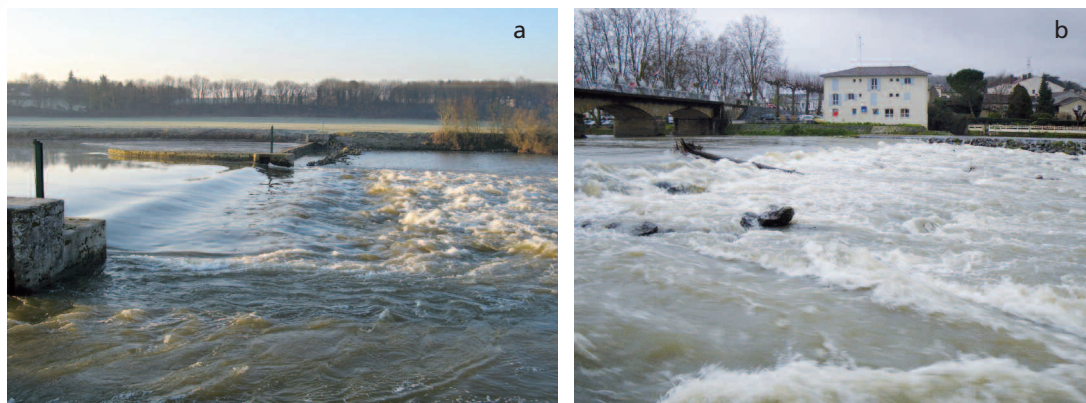
Lors de leur migration vers l'amont, les mulets sont fréquemment capturés dans des passes migratoires situées dans les parties inférieures et moyennes des cours d'eau (Briand et Bousson, 1998). L'état des connaissances actuelles sur ces espèces en matière de franchissement d'obstacles reste toutefois assez limité, avec quelques observations dans des rivières françaises (Garonne, Dordogne, Loire, Seine, Vilaine...) qui confirment le bon potentiel migratoire de cette espèce.

Lorsqu'ils remontent les cours d'eau, les mulets présentent une taille généralement comprise entre 30 et 70 cm. Ils sont globalement de bons sauteurs et de bons nageurs et peuvent franchir dans certaines configurations, des chutes dépassant 1,5 m (Figure 32ab).

Il a été retenu des vitesses de pointe U_{\max} de l'ordre de 4,0 à 5,5 m/s (moyenne de 4,75 m/s), ce qui est en accord avec les vitesses maximales de pointe du mullet cabot *Mugil cephalus* (de l'ordre de 4 m/s pour des poissons d'une vingtaine de centimètres d'après FishBase).

Le tirant d'eau minimal (h_{\min}) retenu pour assurer le passage des individus est de l'ordre de 10 cm.

Figure 32



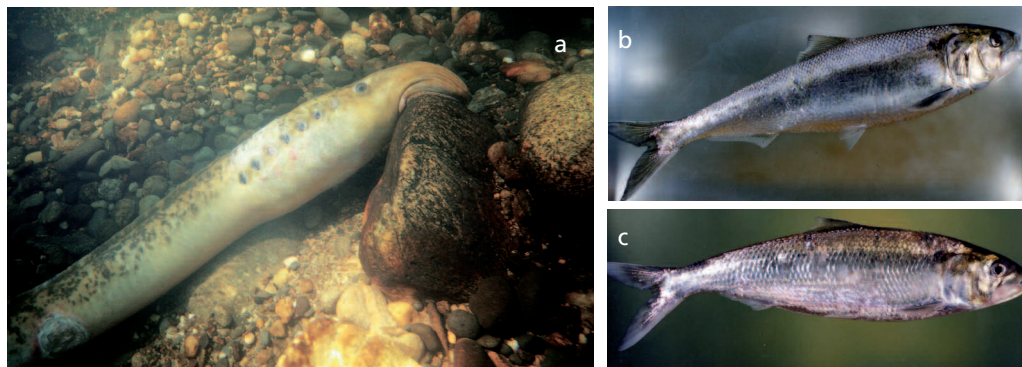
Exemples d'obstacles franchis par des mulets. (a) seuil sur le Cher franchi par des mulets, (b) Seuil d'Aire sur Adour franchi par des mulets.

a © Steinbach - Onema
b © Voegtli - Ecogea

■ Troisième groupe

Il est constitué de la grande alose (*Alosa alosa*, Figure 33b), de l'alose feinte (*Alosa fallax fallax*, Figure 33c) et de la lamproie marine (*Petromyzon marinus*, Figure 33a), qui sont des migrateurs amphihalins anadromes (potamotoques) de la famille respective des Clupeidae et des Petromyzontidae.

Figure 33



a © Ecogea
b, c © Vigneux - Onema

Exemple d'espèces du troisième groupe. (a) Lamproie marine, (b) grande alose, (c) alose feinte.

Les aloses et les lamproies ont été subdivisées en trois sous-groupes (3a pour la grande alose, 3b pour l'alose feinte et 3c pour la lamproie marine) en raison de leurs morphologies très différentes qui les distinguent fortement au niveau de leurs longueurs et notamment du **tirant d'eau minimum nécessaire (h_{\min})** pour le franchissement d'un obstacle par la nage (**15 cm pour la grande alose et 10 cm pour l'alose feinte et la lamproie marine**).

Les aloses fréquemment capturées dans des passes migratoires et les études par radio pistage, notamment dans le Rhône (Roche et Broche, 2005) ont permis de mettre en évidence leurs capacités de franchissement d'obstacles par la nage (Figure 34ab).

La taille des individus en migration est de l'ordre de 30 à 50 cm pour l'alose feinte et de 45 à 70 cm pour la grande alose.

Il a été retenu des **vitesse de pointe U_{\max}** globalement similaires pour les deux espèces avec des vitesses toutefois légèrement plus faibles pour l'alose feinte au vu de sa taille moindre : **de l'ordre de 3,5 à 5,0 m/s** (vitesse moyenne de l'ordre de 4,25 m/s) **pour la grande alose, et de l'ordre de 3,0 à 4,5 m/s** (vitesse moyenne de l'ordre de 3,75 m/s) **pour l'alose feinte**, ce qui est en accord avec les références sur ces espèces (Larinier et Travade, 2002).

Les aloses n'ont pas d'aptitude au saut et éprouvent rapidement des difficultés à franchir des obstacles dès lors que les jets sont plongeants.

Figure 34



a, b © Roche - Onema

Exemple d'obstacles franchis et non franchis par des aloses. (a) Seuil sur l'Ardèche franchi par les aloses. Photo prise en conditions hydrologiques de franchissement, (b) seuil sur la Cèze non franchi par les aloses, sauf en conditions hydrologiques très fortes et rares en période de migration.

La lamproie marine possède un mode de nage bien différent de celui des aloses. Telles qu'elles sont renseignées dans la littérature, ses capacités de nages sont inférieures (Almeida *et al.*, 2007 ; Mesa *et al.*, 2003), mais la lamproie a une aptitude particulière à franchir des obstacles par un comportement de 'burst and attach' (Quintella *et al.*, 2004) qui consiste en une succession rapide de nage en vitesse de pointe suivie d'accrochage au substrat avec sa bouche-ventouse. Cette particularité confère finalement à la lamproie marine des capacités de franchissement supérieures à ce qu'elles seraient si l'on prenait simplement en considération des vitesses de nage. Cela justifie son appartenance au troisième groupe.

Il a été retenu des vitesses équivalentes de sprint U_{max} similaires à celles de l'aloise feinte soit de l'ordre de 3,0 à 4,5 m/s (vitesse moyenne de l'ordre de 3,75 m/s).

Les individus en migration présentent généralement une longueur comprise entre 60 et 90 cm environ.

La lamproie marine comme les aloses ne possède aucune capacité de saut, ce qui ne lui permet pas de franchir facilement des obstacles verticaux avec un décrochage de lame d'eau et une absence de points d'accroche pour leur ventouse (Kemp *et al.*, 2008) (Figure 35).

Figure 35



© Ovidio - Université de Liège-LDPH

Exemple d'obstacle vertical qui bloque les lamproies lors de leur migration vers l'amont.

■ Quatrième groupe

Ce quatrième groupe est constitué de la forme holobiotique de la truite commune (*Salmo trutta*) de la famille des Salmonidae (Figure 36). D'un point de vue systématique, il s'agit de la même espèce que la truite de mer mais les individus présentent le plus souvent des tailles inférieures et des capacités de nage plus réduites.

Figure 36



© Ecogea

Espèce du quatrième groupe. Truite commune.

Ce quatrième groupe a lui-même été subdivisé en deux sous-groupes de classes de tailles (tailles de 15 à 30 cm et tailles de 25 à 55 cm). Ce choix résulte de la grande variation de taille des géniteurs migrants en fonction du type de cours d'eau considéré et de son régime thermique (ruisseaux de tête de bassin, petites et grandes rivières, fleuves).

NB Comme signalé précédemment, pour les truites de mer de petites tailles (< 50 cm), il conviendra plutôt de se rapporter à ce groupe 4 (sous-groupe 4a : truite commune de taille comprise entre 25 et 55 cm). De même pour les truites de lac qui présentent au stade adulte des tailles importantes (> 50-60 cm), il est préférable de se reporter au premier groupe.

Les capacités de nage de la truite sont bien documentées dans la littérature (Kreitman, 1933 ; Hertel, 1966 ; Beach, 1984 ; Bell, 1986) et atteignent jusqu'à 5 m/s en vitesse de pointe pour les plus gros individus. Des observations visuelles (Stuart, 1962) ou par radio-pistage (Ovidio et Philippart, 2002 ; Ovidio et al., 2007) ont permis de mettre en évidence les aptitudes de la truite à franchir des petits obstacles de différentes typologies (chute, pente, combinaison des deux) par le saut et/ou par la nage (Figure 37abcd).

Pour le sous-groupe 4a

qui est constitué par les plus gros sujets de taille comprise entre 25 et 55 cm, il a été retenu des **vitesse de sprint U_{max} comprises entre 3,0 et 5,0 m/s** (moyenne de 4 m/s). Pour cette classe de taille, **le tirant d'eau minimal (h_{min}) pour assurer le passage des individus est de l'ordre de 10 cm.**

Pour le sous-groupe 4b

qui est constitué par les plus petits géniteurs (taille comprise entre 15 et 30 cm), il a été retenu des **vitesse de sprint U_{max} comprises entre 2,5 et 3,5 m/s** (moyenne de 3 m/s). Pour cette classe de taille, **le tirant d'eau minimal (h_{min}) pour assurer le passage des individus est de l'ordre de 5 cm.**

Figure 37



Exemples d'obstacles franchis par des truites communes radio-pistées dans le Sud de la Belgique. (a) L'Aisne, (b) La Lhomme, (c) l'Ourthe, (d) la Vesdre. Les photos a et b sont présentées ici à l'étiage. Les photos c et d ont été prises en conditions hydrologiques de franchissement.

■ Cinquième groupe

Il est composé du brochet (*Esox lucius*) de la famille des Esocidae et de l'aspe (*Aspius aspius*) de la famille des Cyprinidés, deux espèces carnassières holobiotiques (Figure 38ab).

Figure 38



© Ecogea

Exemple d'espèce du cinquième groupe.
Brochet.

Des études sur les migrations et les franchissements d'obstacles par des brochets en rivière ont été réalisées en France (Dubost et Vauclin, 2004) et en Belgique (Ovidio et Philippart, 2002 et 2005). Des déplacements vers l'amont sont fréquemment observés, avec des distances parcourues extrêmes de l'ordre de 16 km (Belgique, Ourthe-Ambève), 20 km (France, Ill), et parfois associés à des franchissements de barrages équipés ou non de passes migratoires (Figure 39ab).

Figure 39



a, b © Ovidio - Université de Liège-LDPH

Exemples d'obstacles franchis par des brochets radio-pistés dans l'Ambève, sud de la Belgique.
Photos prises en conditions hydrologiques inférieures au débit de franchissement. (a) Vue générale de l'obstacle, (b) zoom sur la zone de franchissement.

Les capacités de nage du brochet sont relativement bien connues (Harper & Blake, 1991; Frith et Blake, 1991; Meixner et al., 2010).

Pour l'aspe, des migrations printanières de plusieurs milliers d'individus sont observées annuellement sur les passes à poissons d'Iffezheim et de Gambsheim sur le Rhin. Son expansion rapide depuis 2001 sur les principaux cours d'eau du bassin Rhin-Meuse témoigne de ses capacités de migration importantes (Burgun, 2005).

Pour cette espèce, il existe peu de données dans la littérature. Friedrich (2003) a mesuré sur l'Elbe des vitesses de nage supérieures à 2 m/s pendant la migration pré et post reproduction. Cependant, en pointe, on peut vraisemblablement penser que sa taille importante et sa physionomie lui confèrent comme au brochet, une forte puissance de nage.

Pour ces deux espèces, la taille des géniteurs dépasse fréquemment 50 cm et peut atteindre environ 75 cm pour l'aspe, voire dépasser 100 cm pour le brochet, ce qui implique, de par leur morphologie, de retenir pour ces deux espèces, **un tirant d'eau minimal (h_{\min}) de l'ordre de 15 cm pour assurer le passage des individus.**

Le brochet et l'aspe ne sont pas considérés comme des espèces disposant d'une réelle capacité de saut et utiliseraient plutôt leurs capacités de nage pour le franchissement des obstacles physiques.

Il a été retenu des **vitesse de pointe U_{\max} de l'ordre de 3,5 à 5,0 m/s** (moyenne de 4,25 m/s), ce qui semble être en accord avec les vitesses maximales de pointe fournies dans la littérature.

■ Sixième groupe

Il est composé uniquement de l'ombre commun (*Thymallus thymallus*), espèce holobiotique de la famille des Salmonidae (Figure 40).

Figure 40



a © Onema

Espèce du sixième groupe.
Ombre commun.

L'ombre commun peut effectuer des migrations de reproduction de plusieurs kilomètres, très ciblées dans le temps (Parkinson *et al.*, 1999 ; Meyer, 2001 ; Ovidio *et al.*, 2004 ; Lucas et Bubb, 2005) souvent suivies d'un homing post-reproducteur rapide.

Il existe peu d'informations dans la bibliographie concernant les capacités de franchissement de l'ombre commun. Toutefois, des recherches menées par radio-télémetrie dans les Ardennes belges par Ovidio *et al.* (2007) ont mis en évidence une certaine capacité à franchir des obstacles par saut et/ou nage jusqu'à 1m de chute (Figure 41ab).

Figure 41



a



b

Exemples d'obstacles franchis par des ombres communes radio-pistées dans le Sud de la Belgique. Obstacles sur l'Aisne. Photos prises dans des conditions hydrologiques inférieures au débit de franchissement.

a, b © Ovidio - Université de Liège-LDPH

Il apparaît que ses capacités de saut sont légèrement moindres que celle de la truite de rivière. A titre d'exemple, Lucas et Bubb (2005) ont montré par des marquages pit-tag des aptitudes moindres que la truite de rivière à franchir un obstacle en V d'une hauteur de chute de 0,4 m (36% de réussite pour les ombres contre 84% de réussite pour la truite de rivière).

Les vitesses de nage maximales sont assez proches de celles de la truite commune, bien que légèrement plus faibles. Il a été retenu des **vitesses de sprint U_{max} comprises entre 3,0 et 4,5 m/s** (moyenne de 3,75 m/s).

L'ombre commun en période de migration de reproduction présente une taille généralement comprise entre 25 et 50 cm.

Comme pour le groupe 4a correspondant aux plus gros sujets de truite commune, nous avons considéré au vu de sa morphologie, **un tirant d'eau minimal (h_{min}) pour assurer le passage des individus de l'ordre de 10 cm.**

■ Septième groupe

Le septième groupe est représenté par des Cyprinidae rhéophiles généralement de grandes tailles (barbeau fluviatile *Barbus barbus*, hotu *Chondrostoma nasus*, chevaine *Squalius cephalus* - Figure 42a) et un Petromyzontidae (la lamproie fluviatile *Lampetra fluviatilis* - Figure 42b).

Figure 42



a © Vigneux - Onema
b © Ecogea

Exemples d'espèces du septième groupe. (a) Chevaine, (b) lamproie fluviatile.

Comme pour le troisième groupe, ce groupe a été subdivisé en deux sous-groupes 7a (cyprinidés rhéophiles) et 7b (lamproie fluviatile) en raison de leur morphologie très différente qui les distingue fortement au niveau du **tirant d'eau minimum nécessaire (h_{min}) pour le franchissement d'un obstacle par la nage (10 cm pour les cyprinidés rhéophiles et 5 cm pour la lamproie fluviatile).**

Sous-groupe 7a

Les cyprinidés rhéophiles de grandes tailles ont des besoins vitaux et de fortes aptitudes à réaliser des migrations de plusieurs kilomètres et jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres dans des rivières non fragmentées (Baras, 1992 ; Fredrich, 2003 ; Fredrich *et al.*, 2003 ; Lucas et Batley, 1996 ; De Leeuw et Winter, 2008 ; Ovidio *et al.*, 2007 ; Ovidio et Philippart, 2008).

Ils sont aussi abondants dans les passes migratoires de différentes typologies (Lucas, 2000 ; Slavik *et al.*, 2009 ; Larinier, 2002 ; Ovidio *et al.* 2007).

Au vu de la taille des individus migrants, comprise globalement entre 25 et 80 cm, il a été retenu pour ce groupe 7a, des **vitesses maximales de sprint U_{max} comprises entre 2,5 et 4,0 m/s** (moyenne de 3,25 m/s), ce qui est en accord avec les vitesses de nages renseignées dans la littérature (Kreitmann, 1933; Lucas et Fear, 1997; Environmental Agency, 2007). Les cyprinidés rhéophiles n'ont pas de réelles capacités de saut.

Plusieurs études réalisées par biotéléométrie ont mis en évidence que les cyprinidés rhéophiles ont peu de motivations et/ou d'aptitudes à franchir des barrières physiques (Figure 43ab). Il n'est pas rare d'observer des phénomènes d'accumulation au pied des obstacles dans des cours d'eau fragmentés (Lucas et Fear, 1997; Hubert et Kirchofer, 1998 ; Ovidio et Philippart, 2002, Horky *et al.*, 2007 ; Ovidio et Philippart, 2008).

Figure 43



a, b © Ovidio - Université de Liège-LDPH
c © Capra - Irstea

Exemples d'obstacles non franchis ou franchis par des espèces du groupe 7. (a et b) Obstacles non franchis par des barbeaux et des hotus radio-pistés lors de leur migration vers l'amont dans l'Ourthe (a) et dans la Vesdre (b), (c) obstacle franchi par des hotus et des chevaines suivis par télémétrie acoustique dans le Rhône - Photo prise en conditions hydrologiques proches du débit de franchissement.

Une étude récente réalisée dans le Rhône (Capra *et al.*, non publié) a toutefois montré la capacité de quelques hotus, chevaines et barbeaux à franchir un seuil en pentes en enrochements (Figure 43c, ci-dessus).

Sous-groupe 7b

Comme la lamproie marine, la lamproie fluviatile est capable également de franchir des obstacles par un comportement de 'burst and attach' (Quintella *et al.*, 2004) avec toutefois des capacités plus limitées de par sa taille moyenne (Kemp *et al.*, 2008).

Cette capacité confère à la lamproie fluviatile des capacités de franchissement supérieures à ce qu'elles seraient si l'on prenait uniquement en considération ses vitesses de nages, ce qui lui vaut sa place dans ce septième groupe. Elle possède également des capacités à utiliser les couches limites des écoulements.

Aussi, pour prendre en compte cette spécificité, il a été retenu, pour les lamproies fluviatiles, **des vitesses équivalentes de sprint U_{max} proches de celles fournies précédemment pour les cyprinidés rhéophiles, soit une vitesse maximale de pointe comprise entre 2,0 et 3,5 m/s** (vitesse moyenne de l'ordre de 2,75 m/s).

Les individus en migration présentent généralement une longueur comprise entre 30 et 45 cm environ.

La lamproie fluviatile comme les cyprinidés rhéophiles ne possède **aucune capacité de saut**, ce qui ne lui permet pas de franchir facilement des obstacles verticaux avec un décrochage de lame d'eau et une absence de points d'accroche pour leur ventouse (Kemp *et al.*, 2008).

■ Huitième groupe

Il est composé de neuf espèces holobiotiques : Quatre Cyprinidae ubiquistes (la brème commune *Abramis brama*, la brème bordelière *Blicca bjoerkna*, l'ide mélanote *Leuciscus idus*, les vandoises *Leuciscus sp hors idus*), deux Cyprinidae limnophiles (la carpe commune *Cyprinus carpio* et la tanche *Tinca tinca*), d'un Lotinae (la lote *Lota lota*) et de deux Percidae (le sandre *Sander luciperca* et la perche *Perca fluviatilis*).

Ce huitième groupe a été subdivisé en quatre sous-groupes, essentiellement sur la base des différences de tailles entre les espèces.

Le sous-groupe 8a concerne la carpe commune qui de par sa taille et sa morphologie nécessite un tirant d'eau minimal (h_{\min}) important et voisin de 25 cm.

Le sous-groupe 8b regroupe le sandre et la brème commune qui malgré une différence de taille assez notable nécessitent de par leur différence morphologique, un tirant d'eau minimal (h_{\min}) relativement important et proche de 15 cm.

Le sous-groupe 8c regroupe des espèces de plus petites tailles (brème bordelière, ide mélanote, lote de rivière, perche, tanche), globalement comprises entre 20 et 50 cm (Figure 44ab). De par leurs caractéristiques physiques, ces 5 espèces nécessitent un tirant d'eau minimal (h_{\min}) voisin de 10 cm.

Le sous-groupe 8d est celui des vandoises (hors ide mélanote) qui de par leurs morphologies (taille, hauteur), nécessitent un tirant d'eau légèrement plus faible et voisin de 5 cm.

Figure 44



Exemples d'espèces du huitième groupe. (a) Tanche, (b) perche.

a, b © Daufresne - Irsitea

Sous-groupe 8a et 8b

Bien que la littérature soit peu abondante, on sait que la brème commune et la carpe commune ont le potentiel de parcourir plusieurs kilomètres (voir plusieurs dizaines de kilomètres) durant leur cycle biologique (Molls, 1997; Hladik et Kubecka, 2003; Jellyman, 2009; Jones et Stuart, 2009; Paragamian *et al.*, 2005). Ces espèces peuvent être abondantes dans les échelles à poissons (Horky *et al.*, 2007; Ovidio *et al.*, 2007; Stuart *et al.*, 2008,) et la brème est parfois citée comme une des espèces les plus abondantes dans les passes migratoires de grands fleuves européens (Ovidio *et al.*, 2013 ; Chanseau *et al.*, 2000).

Les données bibliographiques sur les vitesses de nage sont rares et concernent surtout la carpe et dans une moindre mesure la brème commune avec des vitesses de pointes de l'ordre de 0,6 à 3 m/s (Kreitmann, 1933; Komarow, 1971; Zerrath, 1996 ; Tudorache *et al.*, 2008).

Malgré sa morphologie assez semblable au brochet, le sandre a des capacités de nage bien inférieures (Peake *et al.*, 2000 chez *Stizostedion vitreum*; Koed et Thorstad, 2001), ne dépassant pas les 3 m/s. A notre connaissance, il n'existe pas, dans la littérature, d'observations de franchissement de seuils *in situ*. Il est par contre régulièrement observé franchissant des barrages par les dispositifs de franchissement.

Sous-groupe 8c et 8d

Ces espèces (brème bordelière, ide mélanote, lote de rivière, perche, tanche, vandoises) biologiquement très différentes ont toutes été observées dans des passes migratoires ou en nage sur des seuils (Figure 45), (Prchalova *et al.*, 2006; Hladik et Kubecka, 2007; Slavik *et al.*, 2009; Ovidio *et al.*, 2013, données aux diverses stations de contrôles sur les passes installées en France), ce qui montre bien qu'une certaine fraction de la population effectue des migrations de montaison à certaines périodes de l'année.

Figure 45



© Voegtli - Ecogea

Exemple d'obstacle franchi par des perchettes lors de leur migration vers l'amont. Obstacle sur le ruisseau de Hardy en conditions de franchissement.

Des migrations de plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres sont renseignées dans la littérature chez certaines de ces espèces. Elles ont été démontrées à partir de suivis par télémétrie (Baade et Fredrich, 1998; Winter et Fredrich 2003 ; Geeraerts *et al.*, 2007, De Leeuw et Winter, 2008 ; Kuliskova *et al.*, 2009 ; Paragamian *et al.*, 2005).

Les données relatives aux capacités de franchissement d'obstacles sont extrêmement rares et semblent plutôt montrer une faible aptitude à franchir des barrières physiques. Certaines de ces espèces plus ubiquistes, montrent une préférence certaine à se reproduire en aval de seuils plutôt que de tenter de les franchir (Geeraerts *et al.*, 2007 ; Horky *et al.*, 2007).

Il a été retenu pour ce groupe 8 (8a à 8d), **des vitesses de pointe U_{max} de l'ordre de 2,0 à 3,5 m/s** (moyenne de 2,75 m/s). **Ce groupe ne présente aucune capacité de saut.**

■ Neuvième groupe

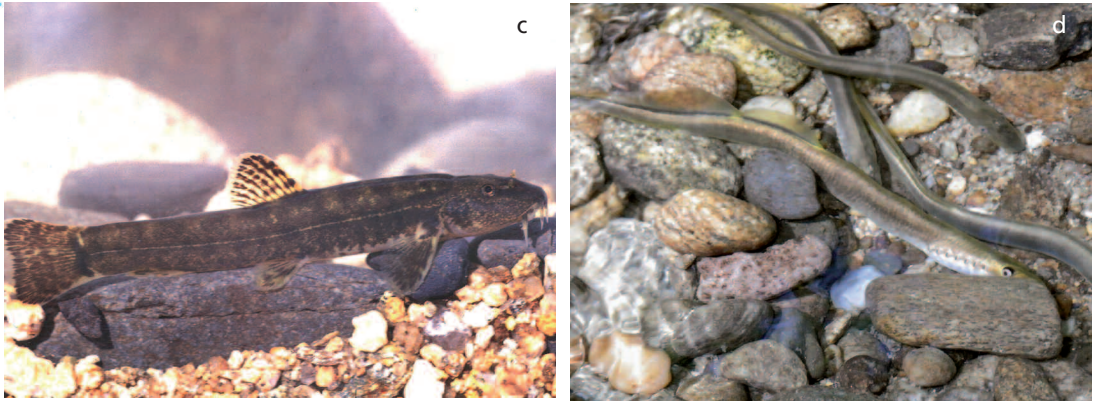
Il est composé de dix **Cyprinidae** (l'ablette commune *Alburnus alburnus*, Figure 46a, le spirilin *Alburnoides bipunctatus*, le barbeau méridional *Barbus meridionalis*, le blageon *Telestes souffia*, le carassin commun *Carassius carassius*, le carassin argenté *Carassius gibelio*, le gardon *Rutilus rutilus*, les goujons *Gobio sp*, le rotengle *Scardinius erythrophthalmus* et le toxostome *Parachondrostoma toxostoma*), deux Percidae (l'apron *Zingel asper* et la grémille *Gymnocephalus cernuus*), un Cottidae (les chabots *Cottus sp.* - plusieurs espèces présentes en France, Figure 46b), deux Cobitidae (la loche de rivière *Cobitis taenia* et la loche franche *Barbatula barbatula*, Figure 46c) et enfin un Petromyzontidae (la lamproie de Planer *Lampetra planeri*, Figure 46d).

Figure 46



a, b © Daufresne - Irstea

Exemples d'espèces du neuvième groupe. (a) Ablette, (b) chabot.



(c) Loche franche, (d) lamproies de planer.

a © Daufresne - Irstea
b © Kardacz - Ecogea

Ce neuvième groupe a été subdivisé en deux grands sous-groupes, séparés sur la base des différences de tailles entre les espèces et du comportement benthique de certaines espèces.

Le sous-groupe 9a regroupe les espèces de plus grande taille généralement comprises entre 10 et 30 cm (ablette commune et spirin, barbeau méridional, blageon, carassin commun, carassin argenté, gardon, rotengle, toxostome).

Le sous-groupe 9b correspond à l'apron, au chabot, aux goujons, à la grémille, à la lamproie de planer, à la loche franche et à la loche de rivière. Ce sont des petites espèces plutôt benthiques qui peuvent nager très près du fond et profiter des faibles vitesses. La taille des individus concernés par ces espèces est légèrement plus faible que celle du groupe 9a avec une taille comprise globalement entre 5 et 15 cm.

Pour prendre en compte le comportement benthique des espèces du groupe 9b et ce malgré leurs tailles légèrement plus faibles que le groupe 9a, il a été retenu pour l'ensemble du groupe 9 un seul **tirant d'eau minimal (h_{\min}) pour assurer le passage des individus de l'ordre de 5 cm et des vitesses de nage similaires.**

Quel que soit le sous-groupe, **aucune des espèces citées ne présente de véritables capacités de saut.**

Sous-groupe 9a

Parmi ces espèces très peu connues du point de vue de leur comportement migratoire, notons que les ablettes communes, les spirins, les gardons et les rotengles sont capturées ou observées, souvent en abondance, dans certaines passes migratoires françaises, et notamment dans certaines conques initialement pour les aloses. Ceci signifie que, malgré leur petite taille, elles ont une certaine aptitude à trouver des voies de passage par nage dans les couches limites des écoulements (Figure 47).

Pour ce groupe, il a été retenu des **vitesses de pointe U_{\max} de l'ordre de 1,5 à 3,0 m/s (moyenne de 2,25 m/s).**

Figure 47



© Ovidio -
Université de Liège-LDPH

Exemple d'obstacle non franchi par des gardons radio-pistés lors de leur migration vers l'amont dans la Vesdre, Belgique. Photos prise en condition d'étiage.

Sous-groupe 9b

Il s'agit d'espèces de petites tailles pour lesquelles les données sur la mobilité et l'étendue de leur domaine vital restent encore très limitées. Les captures dans les passes migratoires sont extrêmement rares car limitées par la taille des individus qui passent à travers les barreaux constituant les cages de capture. Notons que des passages de goujon, vairon, lamproie de planer, loche franche et chabot ont toutefois été enregistrés dans des passes migratoires du Sud de la Belgique (Ovidio *et al.*, 2005, 2007).

Des passes spécifiques pour l'apron ont également été réalisées dans le bassin du Rhône (Gomes *et al.*, 2005) et sont empruntées par cette espèce. Parmi les douze espèces du groupe, le chabot a été le plus étudié en terme de mobilité. Longtemps considéré comme hyper sédentaire, l'utilisation récente de techniques individuelles plus adaptées (colorant, pit-tag, microtélémetrie) ont démontré des tailles de domaines vitaux parfois de l'ordre de plusieurs centaines de mètres (Knaepkens *et al.*, 2004; Breeder *et al.*, 2009; Ovidio *et al.*, 2009).

Quelques données sont disponibles dans la littérature concernant les vitesses de nage. Gaudin et Pradelle (2001) proposent une vitesse de pointe pour l'apron de l'ordre de 1,3 à 1,4 m/s. De Boeck *et al.* (2006) indiquent une valeur de l'ordre de 1,1 m/s pour la loche franche et Zerrath (1996) propose 2,1 m/s pour le goujon. Les vitesses de pointe de l'épinoche seraient de l'ordre de 1,5 m/s (Law et Blake 1995; Whoriskey et Wooton, 1987). Ovidio *et al.* (2007b) ont montré que le chabot est capable de franchir de petits seuils (0,3 à 0,4 m de hauteur) naturels ou artificiels de configuration assez variables, mais présentant généralement de faible pente (jusqu'à 22 %) et des substrats rugueux avec blocs ou en enrochements (Figure 48abcd). La présence d'un seuil vertical ou subvertical de 0,2 – 0,25 m s'avère infranchissable pour cette espèce, ce qui corrobore des hypothèses avancées par Utzinger *et al.* (1998).

Cependant, comme pour le chabot, l'ensemble des autres espèces du sous groupe 9b a la particularité de pouvoir profiter des couches limites de fond au niveau desquelles les vitesses de l'écoulement sont plus faibles. Aussi, pour prendre en compte cette spécificité, il a été retenu **pour ce groupe 9b des vitesses de sprint U_{max} similaires à celles retenues pour le groupe 9a, soit une vitesse maximale de pointe comprise entre 1,5 et 3,0 m/s** (vitesse moyenne de l'ordre de 2,25 m/s).

Figure 48



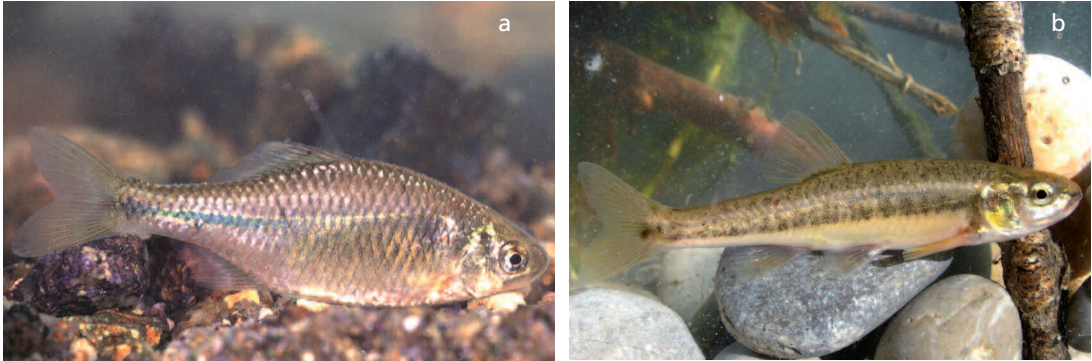
Exemples d'obstacles franchis par des chabots suivis par marquage pit-tag dans le ruisseau de Falogne (Belgique). Photos prises en conditions de franchissement.

a, b, c, d © Ovidio - Université de Liège-LDPH

■ Dixième groupe

Il est constitué de cinq espèces de petites tailles appartenant à sept familles différentes : trois Cyprinidae (l'able de Heckel *Leucaspis delineatus*, la bouvière *Rhodeus amarus* (Figure 49a) et les vairons *Phoxinus sp.* (Figure 49b) plusieurs espèces présentes en France-Atlas des poissons d'eaux douces de France, 2011) et deux Gasterosteidae (l'épinoche *Gasterosteus gymnuris* et l'épinochette *Pungitius laevis*).

Figure 49



Exemples d'espèces du dixième groupe. (a) Bouvière, (b) vairon.

a, b © Daufresne - Irstea

Il s'agit d'espèces de petite taille pour lesquelles les connaissances sur leur mobilité et l'étendue de leur domaine vital restent encore très limitées.

Ces espèces sont sensiblement plus petites que celles du groupe 9, avec des individus globalement compris entre 5 et 10 cm. **Comme pour le groupe 9, il a été retenu pour l'ensemble du groupe 10 un seul tirant d'eau minimal (h_{\min}) pour assurer le passage des individus de l'ordre de 5 cm.**

Les données sur les capacités de franchissement de seuils sont rares. Holthe *et al.* (2005) ont montré par expérimentation en laboratoire que le vairon n'est pas capable de franchir de chute de plus de 27 cm.

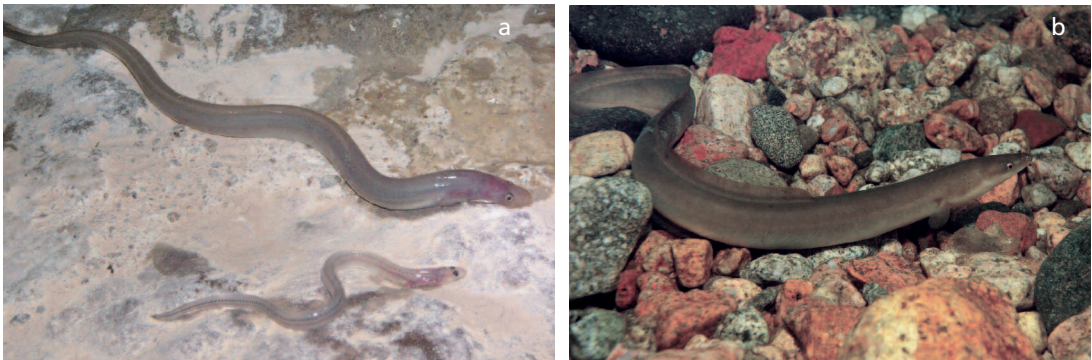
Pour ce groupe 10, il a été retenu des vitesses de pointe U_{\max} de l'ordre de 1 à 2 m/s (moyenne de 1,5 m/s).

Quel que soit le sous-groupe, aucune des espèces citées ne présente des capacités de saut.

■ Onzième groupe

Le onzième groupe est celui de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), espèce migratrice catadrome de la famille des Anguillidae (Figure 50ab).

Figure 50



Exemples d'espèces de poissons du onzième groupe. (a) Civelle et anguilette, (b) anguille jaune.

a © Marty - Onema
b © Daufresne - Irstea

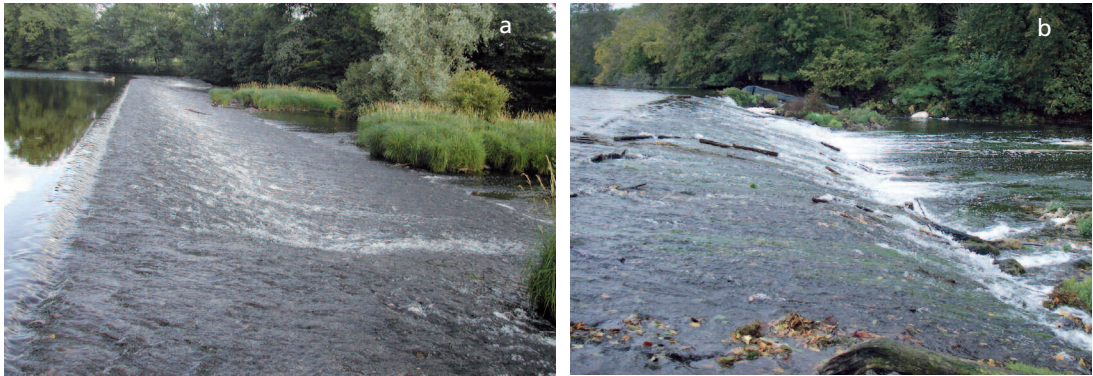
Comme signalé à la section relative aux capacités de franchissement, l'anguille est à considérer différemment des autres espèces en raison notamment de son aptitude à franchir des barrières physiques par reptation sur des surfaces mouillées.

Ses capacités de nage sont faibles par rapport à sa taille. Pour les civelles, les vitesses maximales sont de l'ordre de 30-50 cm/s. La distance parcourue dans un écoulement de 0,30 m/s est voisine de 3 mètres et elle diminue à une trentaine de centimètres pour un courant de 0,5 m/s (Mc Cleave, 1980). Pour des anguillettes et anguilles jaunes, elles sont de l'ordre de 1,0 à 1,5 m/s (Blaxter et Dixon, 1959)

Par contre, **sa capacité de reptation** lui permet de franchir des barrières physiques présentant des hauteurs de chute importantes et à faible charge (Steinbach, 2006) (Figure 51ab). Les plus petits individus sont capables d' "escalader" des parois verticales en utilisant les forces de tension superficielle créées entre leurs corps et la paroi humide (forces proportionnelles à la longueur du poisson). Au cours de sa croissance, le rapport Poids/Tension superficielle augmente de manière proportionnelle avec la taille du poisson, expliquant ainsi que seuls les plus petits individus (de taille inférieure à une douzaine de cm) peuvent utiliser ce mode de progression.

Enfin, l'anguille ne possède pas de capacité de saut.

Figure 51



Exemples d'obstacles franchissables par reptation par une certaine partie de la population d'anguille jaune. Ces ouvrages présentent tout de même un impact à la libre circulation de l'espèce.

Ainsi, au regard de ces différences de capacités de franchissement en reptation et en nage selon la taille des individus, le groupe 11 a été divisé en deux sous-groupes :

- un sous-groupe 11a correspondant aux anguillettes et anguilles jaunes, individus de taille supérieure globalement comprises entre 12 et 40 cm environ ;
- un sous-groupe 11b correspondant aux plus jeunes stades (individus de taille inférieure à une douzaine de centimètres correspondant au stade civelle).

Il a été retenu pour l'anguille des **vitesses de sprint U_{max} de l'ordre de 1,5 m/s pour le groupe des anguillettes (groupe 11a) et de 0,5 m/s pour les jeunes stades (groupe 11b).**

Dans la mesure où elle utilise généralement ses capacités de reptation pour franchir les obstacles et le cas échéant ses capacités de respiration cutanée, on considère que **sa capacité de progression par reptation ne peut pleinement s'exprimer que pour un tirant d'eau maximal de l'ordre de 2 cm. Au-delà d'un tel tirant d'eau on considérera que les forces d'arrachement ne permettent pas l'expression de ces capacités particulières et que la lame d'eau est globalement suffisante pour assurer la nage des anguillettes (sous-groupe 11a).**

Cas des espèces non reprises dans la classification

L'atlas des poissons d'eau douce de France (Keith et al., 2011) renseigne l'existence d'une centaine d'espèces de poissons sur le territoire français (France métropolitaine et Corse).

Dans un souci de simplification dans le cadre de cet ouvrage, le choix a été fait de ne prendre en considération que les taxons les plus fréquemment observés.

La liste des espèces choisies est présentée par ordre alphabétique (Tableau 3) et par groupe d'espèces avec leur capacité de nage et de saut (Tableau 4).

Tableau

3

Liste alphabétique des principales espèces de poissons considérées dans le cadre du protocole ICE et groupe correspondant.

Espèces	Groupe ICE
Able de Heckel (<i>Leucaspis delineatus</i>)	10
Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>)	9a
Ablette sprirlin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>)	9a
Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	3b
Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	11b
Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	11a
Apron (<i>Zingel asper</i>)	9b
Aspe (<i>Aspius aspius</i>)	5
Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)	7a
Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>)	9a
Blageon (<i>Telestes souffia</i>)	9a
Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>)	10
Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>)	8c
Brème commune (<i>Abramis brama</i>)	8b
Brochet (<i>Esox lucius</i>)	5
Carassin (<i>Carassius carassius</i>)	9a
Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>)	9a
Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	8a
Chabots (<i>Cottus</i> sp)	9b
Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>)	7a
Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>)	10
Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>)	10
Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>)	9a
Goujons (<i>Gobio</i> sp)	9b
Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	3a
Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>)	9b
Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	7a
Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>)	8c
Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>)	9b
Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	7b
Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)	3c
Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)	9b
Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>)	9b
Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>)	8c
Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	2
Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	6
Perche (<i>Perca fluviatilis</i>)	8c
Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)	9a
Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)	8b
Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	1
Tanche (<i>Tinca tinca</i>)	8c
Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	9a
Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	1
Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	4b
Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	4a
Vairons (<i>Phoxinus</i> sp)	10
Vandoises (<i>Leuciscus</i> sp hors <i>Idus</i>)	8d

Groupe ICE	Espèces	Espèces sauteuses	V, Sprint Umax associé (m/s)			Hauteur de saut associé (m)		
			Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	Oui	4,5	5,5	6,5	1	1,5	2,5
	Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)							
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	Oui	4	4,75	5,5	0,8	1,1	1,8
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	Non	3,5	4,25	5	-	-	-
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)		3	3,75	4,5			
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)							
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	Oui	3	4	5	0,5	0,9	1,4
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)		2,5	3	3,5	0,3	0,5	0,8
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>)	Non	3,5	4,25	5	-	-	-
	Brochet (<i>Esox lucius</i>)							
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	Oui	3	3,75	4,5	0,4	0,75	1,2
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)	Non	2,5	3,25	4	-	-	-
	Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)							
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)		2	2,75	3,5			
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	Non	2	2,75	3,5	-	-	-
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>) Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)							
	8c								Brème bordelière (Blicca bjoerkna) Ide melanote (Leuciscus idus) Lotte de rivière (Lota lota) Perche (Perca fluviatilis) Tanche (Tinca tinca)
8d								
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette sprirlin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	Non	1,5	2,25	3	-	-	-
	9b								Apron (Zingel asper) Chabots (Cottus sp) Goujons (Gobio sp) Grémille (Gymnocephalus cernuus) Lamproie de Planer (Lampetra planeri) Loche franche (Barbatula barbatula) Loche de rivière (Cobitis taenia)
10	Able de Heckel (<i>Leucaspis delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	Non	1	1,5	2	-	-	-
	11a							
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	< 0,5						

Il est toutefois possible, pour les espèces ne faisant pas partie de la liste présentée dans ces tableaux, de les replacer dans un des groupes sur la base des connaissances biologiques et de leurs caractéristiques morphologiques (tailles minimales et maximales, facteurs de forme...).

Le lecteur trouvera ci-dessous un bref état des connaissances en ce qui concerne l'esturgeon, le flet et le silure.

L'esturgeon (*Acipenser sturio* (Figure 52b)) est un migrateur amphibiotique anadrome de la famille des Acipenseridae. Peu d'études renseignent ses capacités de nage. L'esturgeon jaune de lac *Acipenser fulvescens* présent au Canada et aux Etats-Unis, serait capable, au stade adulte (taille de l'ordre de 130 cm) de maintenir une vitesse de croisière de l'ordre de 1 m/s et pourrait atteindre des vitesses de l'ordre de 1,8 m/s sur de très courtes durées (Peake *et al.*, 1996).

Aucun franchissement d'obstacles par saut n'est renseigné dans la littérature. Cependant, au vu de sa morphologie, il est possible d'avancer que cette espèce ne présente pas de réelle capacité de saut (Lepage, com. pers.).

Le flet (*Platichthys flesus* (Figure 52c)) est un migrateur amphibiotique catadrome de la famille des Pleuronectidae. Les adultes vivent la plus grande partie de leur vie dans les estuaires et les eaux douces des fleuves (jusqu'à des distances de plusieurs centaines de kilomètres de la mer). Au moment de la reproduction, ils se dirigent vers la mer où ils se reproduisent de janvier à avril. Après l'éclosion, une partie des jeunes se dirigent vers les estuaires des fleuves pour continuer leur développement. Ils remontaient jadis assez haut dans certains cours d'eau (Mayence sur le Rhin, Metz sur la Moselle, Orléans sur la Loire, Paris sur la Seine...).

La taille des adultes varie de 20 à 50 cm. Sa morphologie et son mode de nage particuliers ne lui confèrent que des capacités de nage très limitées en comparaison de poissons de la même taille mais à morphologie plus "classique". Duthie (1982) renseigne des vitesses de pointe inférieures à 1,5 m/s ce qui le rapproche des espèces du groupe 10. De plus, ses capacités de saut sont nulles. Le flet a également la particularité d'utiliser un métabolisme anaérobie, même lors de progression en vitesse de nage modérée (Duthie, 1982).

Le silure glane (*Silurus glanis* (Figure 52a)) est une espèce potamodrome de la famille des Siluridae et que l'on rencontre de plus en plus fréquemment dans les grands cours d'eaux européens (Copp *et al.*, 2009). Les données de la littérature sont rares, mais on sait que le silure est capable de réaliser des mouvements dont l'amplitude est souvent calquée sur le déplacement de ses proies (Carol *et al.*, 2007; Pohlmann *et al.*, 2001).

Sa présence dans les passes migratoires est de plus en plus constatée. Les observations de silures menées au niveau de certaines passes à poissons, notamment celles munies de stations de contrôle et situés sur des grands cours d'eau (Garonne, Dordogne...), révèlent des passages de poissons de tailles très variables (quelques dizaines de centimètres à plus de 2 m).

Les capacités de nage du silure glane sont peu connues. Cependant, une étude récente menée sur les juvéniles de *S. meridionalis* (Zeng *et al.*, 2009), espèce proche de *S. glanis* renseigne une vitesse critique maximale de 3,4 longueurs de corps par seconde à 28°C. De plus, les adultes sont très puissants et capables d'accélération brèves pour la capture des proies.

Par contre, il n'existe à l'heure actuelle aucune connaissance sur l'aptitude du silure à franchir des obstacles physiques par saut. Sa morphologie doit toutefois constituer un désavantage important.

Figure 52



Exemples d'espèces.
(a) *Silure glane*,
(b) *esturgeon*,
(c) *flet*.

a, b, c © E. Vigneux - Onema

Définition des classes de franchissabilité

L'objectif de la démarche ICE est de permettre aux utilisateurs de déterminer l'impact potentiel d'une barrière sur la circulation piscicole à partir de critères simples et de moyens humains et matériels faciles à mettre en œuvre.

Ce protocole repose sur la confrontation de la géométrie et des conditions hydrauliques au niveau de l'ouvrage avec les capacités physiques de nage et de saut des espèces de poissons considérées.

Attention. Bien que la démarche proposée dans cet ouvrage se veuille la plus logique et la plus rigoureuse possible, elle demeure simplificatrice étant donné l'état des connaissances sur les capacités de franchissement de certaines espèces, la variabilité des capacités de nage au sein d'une espèce ou d'un groupe d'espèce donné, la complexité géométrique de certains obstacles pouvant induire une grande hétérogénéité des conditions hydrauliques pour un débit donné, ainsi que la variabilité des conditions hydrologiques et thermiques en période de migration.

Dans ce contexte, il est apparu préférable de raisonner en classes de franchissabilité, à l'image des démarches comparables au protocole ICE qui ont été menées dans différents pays (Tableau 5).

Tableau 5 Synthèse des principales méthodes développées dans le monde pour l'évaluation de la franchissabilité d'un ouvrage.

Pays	Organisme ou/et Références	Espèces	Types d'ouvrages	Nombre de classes	Principaux critères pris en compte
USA	Washington Department of Fish and Wildlife (WDFD, 2000)	Salmonidés	Divers, avec essentiellement les ouvrages routiers et les ouvrages à marée	4 classes : 0%, 33%, 66%, 100%	Niveau A : pente, chute, profondeur Niveau B : Longueur, vitesse, profondeur, chute, type d'ouvrage
	US Department of Agriculture (USDA) (Clarkin et al., 2005)	Toutes espèces, mais plutôt ciblée sur les salmonidés	Ouvrages routiers	3 classes (Vert, Gris et Rouge)	Pente, chute aval, pente, longueur, vitesses
	Coffman (2005)	3 groupes d'espèces : salmonidés, cyprinidés, percidés et cottidés	Ouvrages routiers	3 classes (Vert, Rouge et Indéterminé)	Pente, chute aval, pente, longueur, vitesses
Nouvelle Zélande	James et Joy (2008)	Toutes espèces	Tous ouvrages	4 classes	Expertise
Allemagne	DWA (2005)	Toutes les espèces	Tous ouvrages	4 classes	Selon les critères des passes à poissons (chute essentiellement)
Belgique (Wallonie)	Service Public de Wallonie et Université de Liège (2013)	Toutes les espèces	Tous ouvrages	4 classes	Expertise
Grande Bretagne	Kemp et al. (2008) Kemp et O'Hanley (2010)	Groupes d'espèces : saumon, truite, lamproie, cyprinidés, juvéniles salmonidés, jeunes anguilles, smolts, juvénile lamproie, anguille argentée	Tous ouvrages	4 classes : 0%, 33%, 66%, 100%	Chute, vitesse, profondeur, ressaut
Espagne (Catalogne)	Solà et al. (2011)	4 groupes d'espèces : espèces marines ou estuariennes anguille, cyprinidés et salmonidés	Tous ouvrages	5 classes : de mauvais à très bon	Chute, fosse, tirant d'eau, pente, vitesse

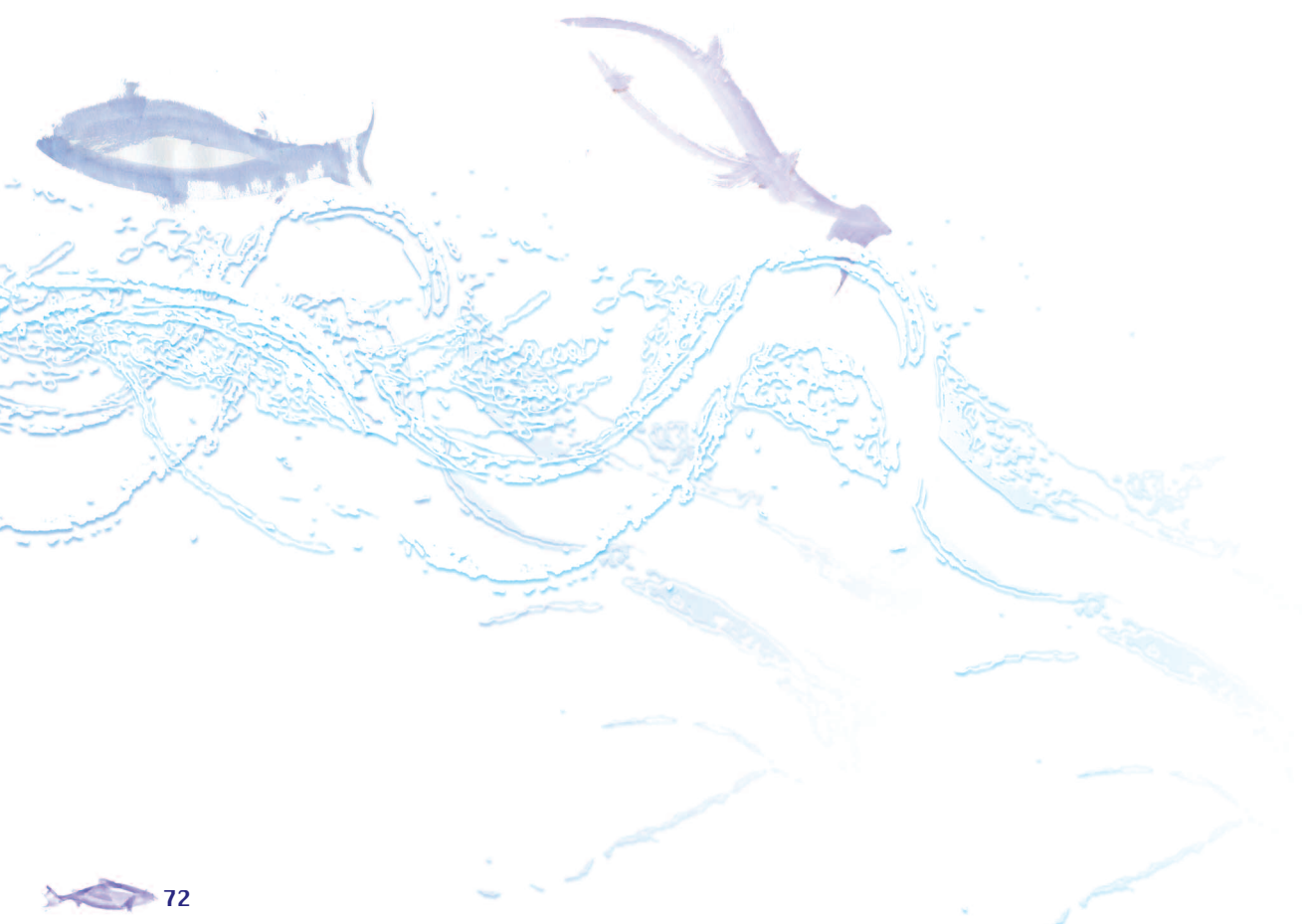
Dans le cadre du protocole ICE, cinq classes ont été retenues. Les définitions adoptées pour chaque classe sont globalement en accord avec celles proposées par Kemp *et al.* (2008) et Kemp et O'Hanley (2010).

Pour chacune des classes, des indices avec code couleur ont été associés (0, 0,33, 0,66 et 1) afin de faciliter la mise en œuvre de la méthodologie et la compréhension.

Attention. Les 4 indicateurs de discontinuité ichthyologique choisis (0 ; 0,33 ; 0,66 et 1) ne doivent pas être considérés comme des taux de franchissement par espèce ou groupe d'espèces. Ces chiffres représentent d'avantage la nécessité d'actions de restauration au niveau de l'ouvrage. C'est ainsi moins un pourcentage qu'un degré de dégradation et de besoin d'intervention opérationnelle qui est exprimé (plus l'indicateur sera proche de zéro plus l'impact est important et plus la nécessité d'intervention sera élevée).

Une classe indéterminée (NC) a été créée dans les cas plus complexes où une expertise plus poussée s'avère nécessaire pour évaluer l'indice de franchissabilité (ouvrages complexes...). Cette classe pourra être utilisée dans l'attente d'une éventuelle expertise spécifique ultérieure.

La définition des classes de franchissabilité est donnée ci-après. Les critères et la démarche permettant de déterminer les classes de franchissabilité pour un obstacle en fonction de sa typologie et d'un groupe d'espèces donné sont détaillés ultérieurement.



■ Barrière totale (Classe ICE = 0)

La barrière est infranchissable pour les espèces-cibles/stades du groupe considéré et constitue un obstacle total à leur migration.

Il est toutefois possible que dans des conditions exceptionnelles, l'obstacle se révèle momentanément franchissable pour une fraction de la population.

■ Barrière partielle à impact majeur (Classe ICE = 0,33)

La barrière représente un obstacle majeur à la migration des espèces-cibles/stades du groupe considéré.

L'obstacle est infranchissable une grande partie du temps et/ou pour une partie très significative de la population. Le franchissement de l'obstacle à la montaison n'est possible que durant une partie limitée de la période de migration et pour une fraction limitée de la population du groupe considéré. L'obstacle provoque des retards de migration préjudiciables au bon déroulement du cycle biologique des espèces.

■ Barrière partielle à impact significatif (Classe ICE = 0,66)

La barrière représente un obstacle significatif à la migration des espèces-cibles/stades du groupe considéré.

Le franchissement de l'obstacle à la montaison est possible une grande partie du temps et pour la majeure partie de la population. L'obstacle est néanmoins susceptible de provoquer des retards de migration non négligeables.

L'obstacle reste donc néanmoins infranchissable une partie de la période de migration pour une fraction significative de la population du groupe considéré.

■ Barrière franchissable à impact limité (Classe ICE = 1)

La barrière ne représente pas un obstacle significatif à la migration des espèces-cibles/stades du groupe considéré.

La plus grande partie de la population est capable de la franchir dans un laps de temps court et sans dommage. Cela ne signifie pas que la barrière n'occasionne absolument aucun retard de migration ou que tous les individus du groupe considéré la franchissent sans dommage.

■ Barrière à impact indéterminé (Classe ICE = NC)

La franchissabilité de l'obstacle n'est pas appréciable avec les seules données ICE. L'évaluation de l'impact nécessite des investigations complémentaires ou une analyse plus poussée.

NB Ce principe peut être appliqué également au diagnostic à la dévalaison. Cependant, comme évoqué dans la section décrivant le principe du protocole ICE, dans le cadre de la démarche, au regard de la complexité des mécanismes de dévalaison, il a été décidé de ne pas définir de critères destinés à appréhender la franchissabilité des ouvrages à la dévalaison. Une expertise spécifique par des techniciens spécialisés s'impose.

Diagnostic de la franchissabilité à la montaison

76 ■ Cas des éléments fixes des seuils et barrages

116 ■ Cas des éléments mobiles d'un obstacle

122 ■ Cas des ouvrages routiers ou ferroviaires

138 ■ Cas des ouvrages de marée

142 ■ Cas des obstacles complexes ou mixtes

145 ■ Le cas particulier de l'anguille



Cas des éléments fixes des seuils et barrages

Les différentes configurations rencontrées

Les conditions hydrauliques sur les parties fixes des obstacles sont fonction à la fois du type d'ouvrage, de sa géométrie (hauteur, profil, pente et distance à franchir), de la nature des matériaux constitutifs (béton, enrochements...) et des débits qui y transitent.

En fonction de la configuration du parement (Figure 53), plusieurs types de situation peuvent être rencontrés.

■ Chutes verticales ou quasi-verticales que le poisson ne peut franchir que par le saut

Pour les seuils à parement vertical ou quasi-vertical, les déversements sur le seuil forment généralement une chute avec un jet plongeant ne permettant plus le passage par nage au niveau de l'écoulement (sauf cas spécifique de chute très faible où l'écoulement peut devenir à jet de surface).

La majorité des observations et études comportementales montre qu'au-dessus d'une pente du coursier aval de l'ordre de 60°, toutes les tentatives de franchissement s'effectuent par saut. Par contre, pour une pente de 40°, 50% des tentatives se font par la nage (Lauritzen *et al.* 2010). Ainsi, **un seuil sera globalement considéré comme vertical ou quasi-vertical, dès lors que la pente du parement aval est supérieure à 150% (56°)².**

NB Seul un nombre limité d'espèces (truite de mer, saumon atlantique, truite de rivière, mulot et ombre commun) est réellement capable de franchir un obstacle par le saut, à condition toutefois que le poisson trouve au pied de l'obstacle des conditions lui permettant de prendre son appel.

■ Parements inclinés que le poisson peut franchir par la nage

La franchissabilité d'un seuil incliné dépend des caractéristiques de l'écoulement sur le coursier (tirants d'eau, vitesses) et de la distance à franchir (directement fonction de la pente du coursier et de la hauteur de l'ouvrage) qui doivent être mises en relation avec les capacités de nage (vitesse de nage U_{max} et endurance à cette vitesse maximale) et les caractéristiques morphologiques (hauteur du poisson) des espèces ciblées.

■ Configurations plus complexes comportant une succession de parties en pente et de parties plus ou moins verticales (présence de redans)

Un redan (ou redent) est un décrochement dans le parement du seuil venant briser la continuité du profil en long. La présence d'un ou plusieurs redans (seuil en escalier, présence d'une rehausse en crête de seuil...) peut significativement dégrader la franchissabilité, plus particulièrement en condition de bas débit. L'impact est alors fonction du type d'écoulement induit par le ou les redans.

2- Lors d'un diagnostic ICE il est régulièrement fait référence à la notion de pente de tout ou partie d'un ouvrage. La pente est l'inclinaison d'une structure. Elle est classiquement exprimée en pourcentage. L'utilisation d'un angle exprimé en degrés décimaux pour la caractériser est également fréquente même s'il ne s'agit pas à proprement parlé d'une pente mais plutôt d'un angle d'élévation. Afin de faciliter l'utilisation de ces notions par le lecteur, les auteurs rappellent ici la méthode de conversion simple de l'expression d'une pente en pourcentage vers une pente en degrés décimaux et réciproquement :

$$\alpha = \arctan (p/100)$$

$$p = \tan (\alpha) \times 100$$

où α = angle d'élévation exprimé en degrés décimaux et p = pente exprimée en pourcentage (entre 0 et 100).

Généralement, les parties fixes (déversoir, coursier) des seuils et barrages sont construites de nos jours en béton armé alors que pour les ouvrages antérieurs au 20^e siècle, elles étaient construites en maçonnerie. Ces différences de matériaux influencent toutefois assez peu les conditions d'écoulement (tirant d'eau et vitesse d'écoulement).

Attention. L'analyse hydraulique au niveau des seuils en enrochements est beaucoup plus délicate que celle des seuils "classiques". Cette particularité résulte de la variabilité du mode d'organisation, des formes et des dimensions des blocs qui les constituent, d'autant plus que leur mise en oeuvre lors des travaux n'est jamais très précise. Aussi, dans le cadre du protocole ICE, des critères spécifiques à ces obstacles particuliers ont été définis.

Figure 53



Exemples de configurations d'obstacles pouvant être rencontrées. (a) Seuil vertical présentant un jet plongeant, (b) seuil complexe présentant une chute aval et un coursier avec un redan en amont, (c) seuil incliné présentant un redan en amont, (d) seuil incliné, (e) seuil en enrochements, (f) seuil en enrochements à forte pente et par faible hydrologie.

a © Larinier - Pôle Ecohydraulique, b © Burgun - Onema
c, d © Chanseau - Onema, e © Boucharde - Onema, f © Voegtli - Ecogea

Les paramètres géométriques ou hydrauliques permettant d'appréhender la franchissabilité des ouvrages, dans les configurations les plus simples, sont les suivants :

■ **pour une chute verticale ou quasi-verticale** : la différence entre les cotes des niveaux d'eau amont et aval, la hauteur de l'obstacle (différence de niveau entre la cote du seuil et le niveau d'eau aval), la profondeur de la fosse aval, le débit unitaire (débit par mètre de largeur), et la configuration géométrique de la crête conditionnant la vitesse initiale de l'écoulement avant la chute ;

■ **pour un ouvrage à parement aval incliné** : la différence entre les cotes des niveaux d'eau amont et aval, la hauteur de l'obstacle (différence de niveau entre la cote du seuil et le niveau d'eau aval), la profondeur de la fosse aval, la pente et la rugosité du coursier, le débit unitaire déterminant l'évolution du tirant d'eau et des vitesses sur le coursier.

NB Lorsque l'ouvrage est en escalier, c'est-à-dire lorsqu'il est constitué de plusieurs marches verticales séparées par des parties plus ou moins longues horizontales ou inclinées, la configuration de l'écoulement ainsi que sa description deviennent plus complexes, et le passage du poisson généralement plus difficile. En outre la description et l'évaluation de la franchissabilité peuvent être plus délicates lorsque l'ouvrage n'est pas homogène sur toute sa largeur.

Le degré de franchissabilité résulte généralement de la combinaison des valeurs de ces différents paramètres et souvent du caractère limitant de l'un d'entre eux.

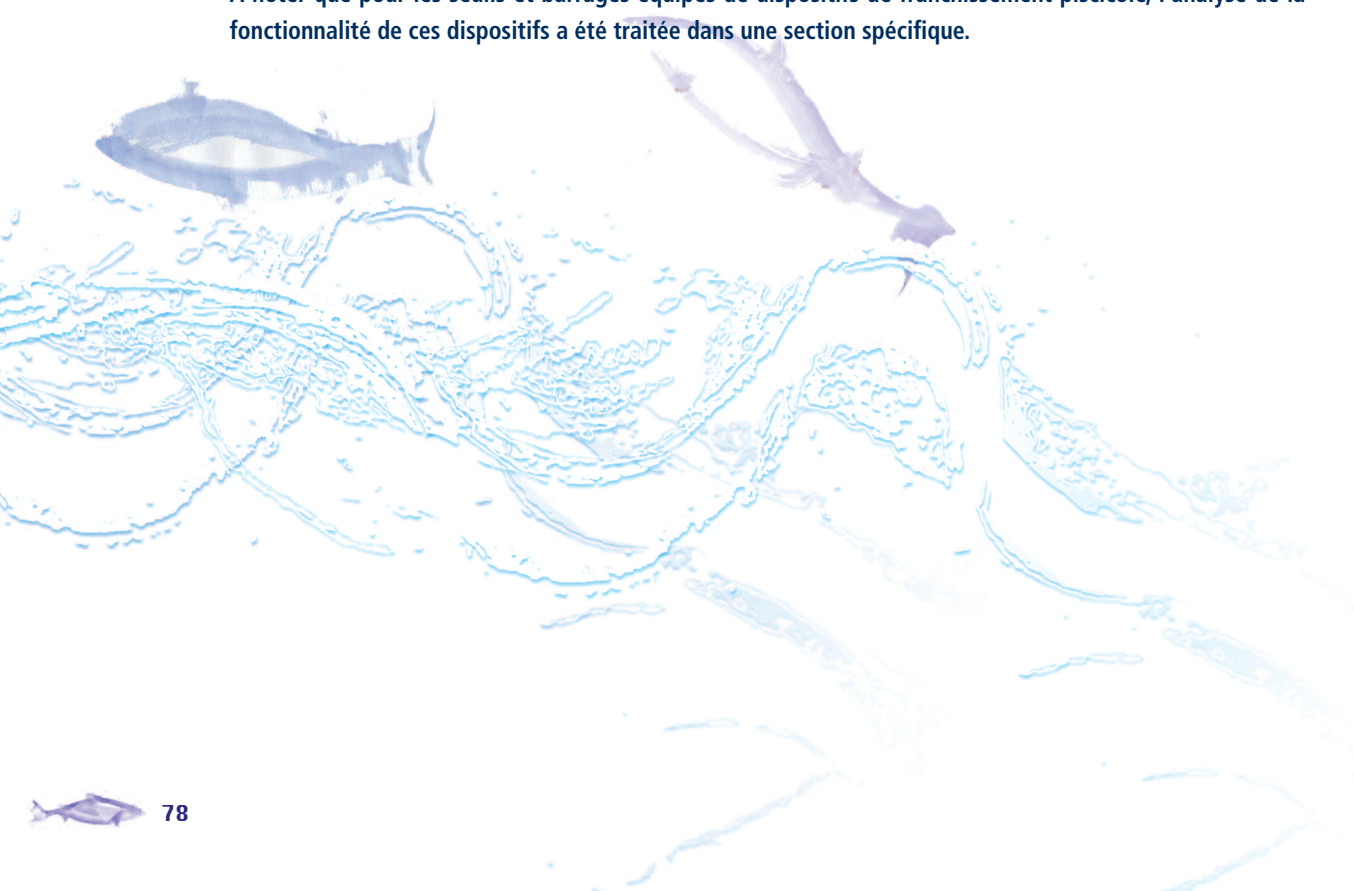
Dans ce chapitre, la méthodologie permettant de définir la classe de franchissabilité a été décrite pour :

- les seuils présentant une chute verticale ou quasi-verticale (pente > 150%) ;
- les seuils à parement aval incliné (pente ≤ 150%) ;
- les seuils en enrochements, cas particuliers de seuil à parement incliné, qui, du fait de leur nature constructive, créent généralement des écoulements très hétérogènes.

Le cas des passages par-dessus des organes mobiles (clapets notamment) pourra s'apparenter à des seuils présentant une chute verticale ou quasi-verticale.

Enfin, pour l'anguille, au vu de ses capacités de franchissement particulières, il conviendra de se référer à la section qui lui est spécialement consacrée.

A noter que pour les seuils et barrages équipés de dispositifs de franchissement piscicole, l'analyse de la fonctionnalité de ces dispositifs a été traitée dans une section spécifique.



Les obstacles verticaux ou quasi-verticaux

(pente >150%)

Critères de franchissabilité pour les espèces sauteuses

Comme précisé dans la section relative aux capacités de franchissement des poissons, dès lors que la charge sur le seuil et la fosse en pied de chute sont suffisantes, les poissons sauteurs sont capables d'effectuer des sauts de hauteur maximale de l'ordre de $L_p/2 + (U_{\max} \sin\beta)^2/2g$ (Tableau 2 chapitre A).

■ Définition des classes de franchissabilité

Sur la base du tableau 4 (chapitre précédent) donnant les hauteurs de saut maximales théoriques associées à la classe de taille retenue pour le stade et l'espèce, la classification suivante a été retenue, sous réserve d'une charge sur le seuil et d'une profondeur de fosse suffisantes.

Si la hauteur de chute DH est inférieure à la hauteur de saut théorique associée à la taille minimale $L_{p\min}$ des poissons de l'espèce considérée (DH_{\min}), l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact limité** (Classe ICE = 1).

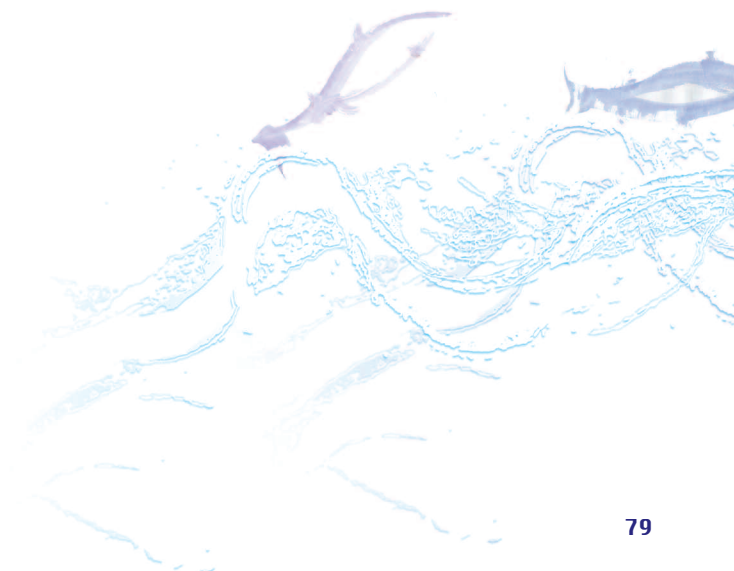
Si la hauteur de chute DH est comprise entre les hauteurs de saut théoriques associées aux tailles minimale $L_{p\min}$ (DH_{\min}) et "moyenne" $L_{p\text{moy}}$ (DH_{moy}) des poissons de l'espèce considérée, alors l'obstacle pourra être considéré comme une **barrière à impact significatif** (Classe ICE = 0,66).

Si la hauteur de chute DH est comprise entre les hauteurs de saut théoriques associées aux tailles "moyenne" $L_{p\text{moy}}$ (DH_{moy}) et maximale $L_{p\max}$ (DH_{\max}) de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact majeur** (Classe ICE = 0,33).

Enfin, si la hauteur de chute DH est supérieure à la hauteur de saut théorique associée à la taille maximale $L_{p\max}$ des poissons de l'espèce considérée (DH_{\max}), l'obstacle peut être considéré comme une **barrière totale** (Classe ICE = 0).

■ Chute totalement infranchissable $DH_{\text{extrême}}$

Afin de réduire au maximum le temps passé sur le terrain et éviter notamment des prises de mesure inutiles, il a été considéré que, dès lors que la chute est supérieure à DH_{\max} , hauteur de chute théorique maximale franchissable associée à des poissons de taille $L_{p\max}$, majorée d'environ 50 cm ($DH_{\text{extrême}}$), l'obstacle est forcément infranchissable et qu'il n'est pas nécessaire décrire plus finement le site. Cette chute a été nommée $DH_{\text{extrême}}$.



Cas des espèces non sauteuses

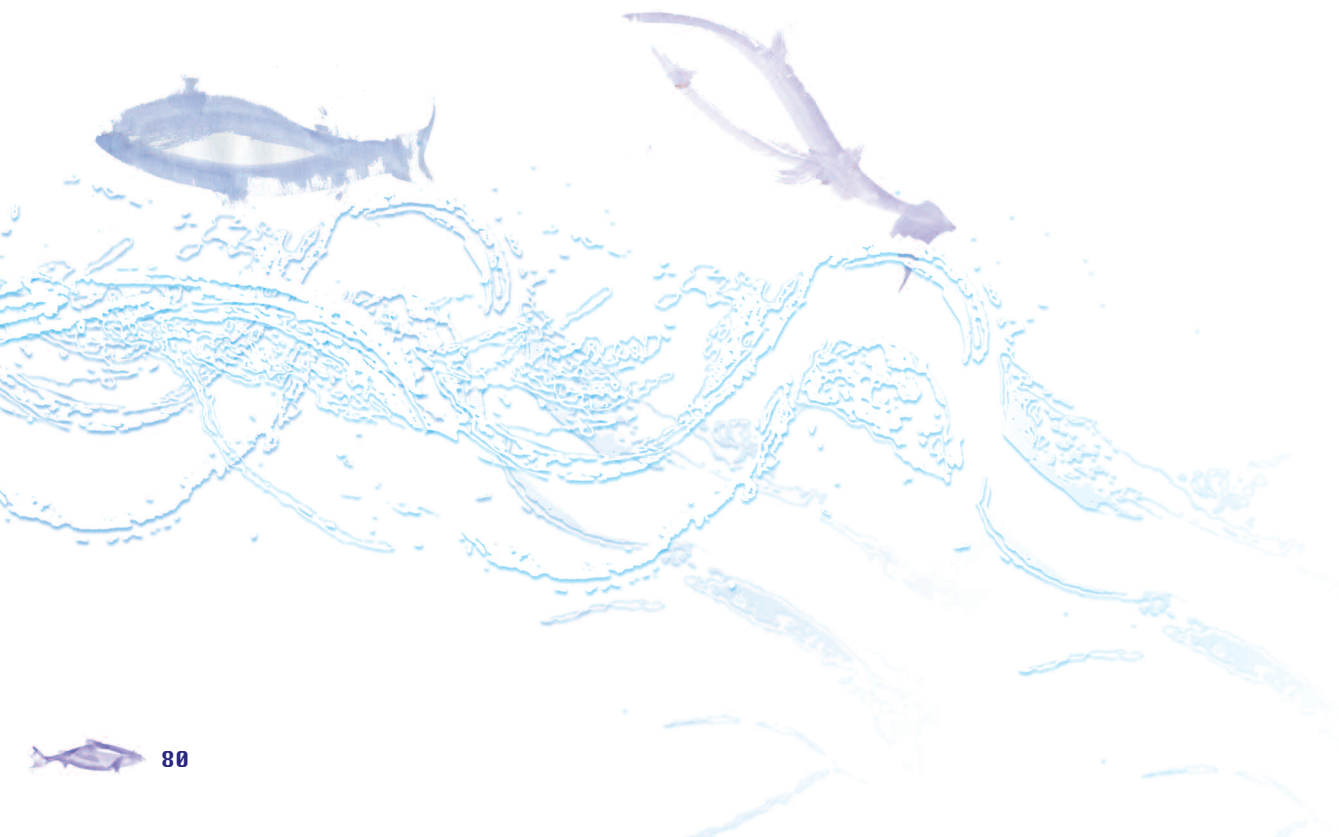
Les obstacles verticaux ou quasi-verticaux provoquent généralement des chutes que les espèces ne peuvent franchir qu'en faisant appel à leur capacité de saut.

Les espèces non sauteuses peuvent toutefois franchir une chute verticale lorsque les conditions d'écoulement répondent à plusieurs critères (Figure 54), à savoir :

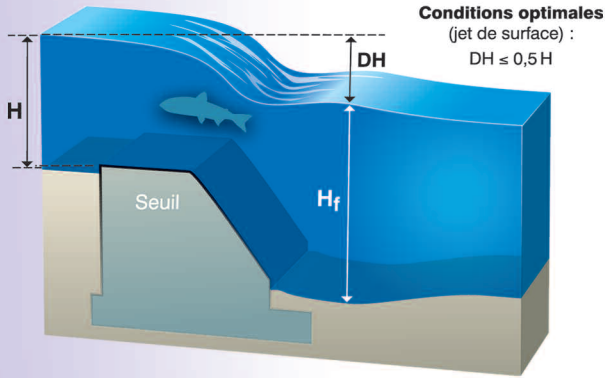
- l'écoulement doit être " de surface ". Ce type d'écoulement apparaît globalement, dès lors que la chute (DH) est inférieure à 0,5 fois la charge H sur le seuil. Un jet quasi de surface ($0,5H < DH < H$) permet toutefois d'assurer un certain franchissement sans pour autant créer des conditions optimales ;
- le tirant d'eau sur le seuil doit être suffisant pour permettre la nage du poisson. Cette condition sera considérée comme remplie dès lors que la charge H est supérieure ou égale à H_{\min} , critère défini dans la section sur les capacités de franchissement des poissons ;
- la fosse en pied de seuil (H_f) doit être suffisante et doit répondre globalement au critère ($H_f \geq H_{f\min}$) défini dans la section sur les capacités de franchissement des poissons ;
- la vitesse d'écoulement V doit rester compatible avec les capacités de nage des espèces ciblées.

La classification suivante a été retenue, à l'indispensable et préalable condition que les autres critères soient strictement respectés (écoulement de surface, profondeur de fosse et charge suffisantes) :

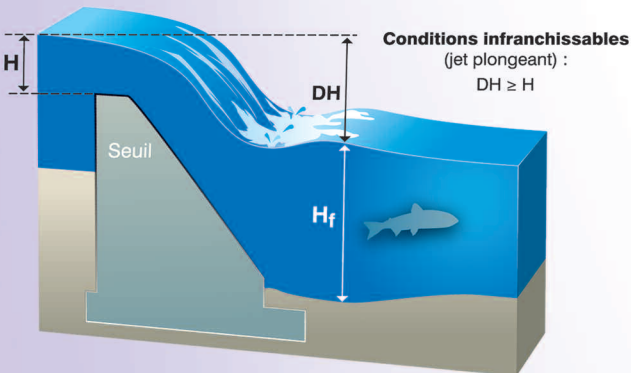
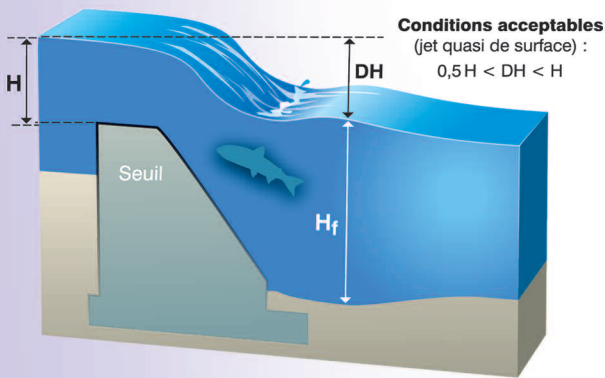
- si la vitesse de l'écoulement dans le jet créée par la chute (DH) est inférieure à la vitesse de sprint (U_{\max}) associée à la taille minimale des poissons ($L_{p\min}$) de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact limité (Classe ICE = 1)** ;
- si la vitesse de l'écoulement dans le jet créée par la chute (DH) est comprise entre les vitesses de sprint (U_{\max}) associées aux tailles minimale ($L_{p\min}$) et " moyenne " ($L_{p\text{moy}}$) des poissons de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact significatif (Classe ICE = 0,66)** ;
- si la vitesse de l'écoulement dans le jet créée par la chute (DH) est comprise entre les vitesses de sprint (U_{\max}) associées aux tailles " moyenne " ($L_{p\text{moy}}$) et maximale ($L_{p\max}$) des poissons de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact majeur (Classe ICE = 0,33)** ;
- si la vitesse de l'écoulement dans le jet créée par la chute (DH) est supérieure à la vitesse de sprint (U_{\max}) associée à la taille maximale ($L_{p\max}$) des poissons de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière totale (Classe ICE = 0)**.



Conditions de franchissement pour les espèces non sauteuses
 $H_f \geq H_{fmin}$ $H \geq h_{min}$ $DH \leq U_{max}^2 / 2g$ avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$



a, b, c © Voegtli - Ecogea



Type de jets et conditions de franchissement d'espèces non sauteuses au niveau d'un obstacle vertical ou quasi vertical (pente >150 %). (a) jet de surface, (b) jet quasi de surface, (c) jet plongeant (chute).

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Le tableau 7, ci-contre p 83, récapitule, les différentes valeurs-seuils permettant de déterminer la franchissabilité d'un seuil vertical ou quasi vertical (pente > 150 %).

Le tableau 8, ci-dessous, présente les ordres de grandeur des profondeurs de fosse minimales nécessaires H_{fmin} en fonction de la hauteur de chute et de l'angle d'incidence du jet (ou pente du seuil).

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 55) permettant de définir la classe de la franchissabilité ICE.

Tableau

8 *Ordre de grandeur de la profondeur minimale de fosse (H_{fmin}) nécessaire pour permettre au poisson de franchir un obstacle à parement vertical ou quasi-vertical (>150%).*

Chute DH (m)	Hauteur de fosse nécessaire (H_{fmin}) en pied de chute verticale ou quasi-verticale (>150%)
$\leq 0,25$	0,30 m
]0,25 - 0,50]	0,45 m
]0,50 - 0,75]	0,70 m
]0,75 - 1,00]	0,85 m
]1,00 - 1,50]	1,00 m
]1,50 - 2,00]	1,20 m
> 2,00	1,40 m

Synthèse de différents critères élémentaires (comportement, charge et hauteur de chute) permettant de définir les classes de franchissabilité ICE de seuils verticaux ou quasi verticaux (pente > 150%) à l'aide de l'arbre de décision de la figure 55.

Groupe ICE	Espèces	Espèces sauteuses	Charge minimale sur l'obstacle (Hmin)	Valeurs seuils de chute pour le diagnostic de seuil à parement vertical >150% (m)				DH extrême
				Classe ICE				
				1	0,66	0,33	0	
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	Oui	0,20 m	≤ 1,00	]1,00 - 1,50]	]1,50 - 2,50]	> 2,50	3,00 m
	Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)							
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	Oui	0,10 m	≤ 0,80	]0,80 - 1,10]	]1,10 - 1,80]	> 1,80	2,50 m
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	Non	0,15 m	≤ 0,60	]0,60 - 1,00]	]1,00 - 1,40]	> 1,40	2,00 m
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)		0,10 m					
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)		0,10 m					
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	Oui	0,10 m	≤ 0,50	]0,50 - 0,90]	]0,90 - 1,40]	> 1,40	2,00 m
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)		0,05 m	≤ 0,30	]0,30 - 0,50]	]0,50 - 0,80]	> 0,80	1,50 m
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	Non	0,15 m	≤ 0,60	]0,60 - 1,00]	]1,00 - 1,40]	> 1,40	2,00 m
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	Oui	0,10 m	≤ 0,40	]0,40 - 0,75]	]0,75 - 1,20]	> 1,20	1,50 m
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>) Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	Non	0,10 m	≤ 0,30	]0,30 - 0,60]	]0,60 - 0,90]	> 0,90	1,50 m
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)		0,05 m					
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	Non	0,25 m	≤ 0,20	]0,20 - 0,50]	]0,50 - 0,70]	> 0,70	1,50 m
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>) Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)		0,15 m					
	8c		Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>) Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>) Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>) Perche (<i>Perca fluviatilis</i>) Tanche (<i>Tinca tinca</i>)						0,10 m
8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors Idus</i>)		0,05 m					
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette spirilin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	Non	0,05 m	≤ 0,15	]0,15 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	> 0,50	1,00 m
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>) Chabots (<i>Cottus sp</i>) Goujons (<i>Gobio sp</i>) Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>) Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>) Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>) Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)							
10	Able de Heckel (<i>Leucaspius delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	Non	0,05 m	≤ 0,10	]0,10 - 0,20]	]0,20 - 0,30]	> 0,30	1,00 m
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	Non	0,02 m	≤ 0,20	]0,20 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	> 0,50	1,00 m
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)		-	-	-	-	-	

(* Les valeurs fournies pour l'anguille correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant uniquement en compte les capacités de nage de l'espèce. Dans le cas où l'obstacle présente une zone de reptation en complément, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à la reptation (voir section dédiée au cas particulier de l'anguille).

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir l'état de franchissabilité d'un obstacle à parement vertical et sa classe ICE sont les suivantes (Figure 55) :

1- Comparaison de la hauteur de chute DH avec $DH_{\text{extrême}}$ (voir Tableau 7, page précédente)

Si la chute totale $DH \geq DH_{\text{extrême}}$, arrêter l'analyse. L'ouvrage est un obstacle totalement infranchissable pour l'espèce considérée ou le groupe d'espèces ciblées (Classe ICE = 0).

Si $DH < DH_{\text{extrême}}$, prendre toutes les mesures concernant l'ouvrage (profils en long, charge, fosse) puis aller en 2.

2- Analyse de la charge sur l'obstacle

Si la charge sur le seuil $H \geq H_{\text{min}}$ (voir Tableau 7), aller en 3 car la charge est suffisante.

Si $H < H_{\text{min}}$, l'obstacle peut être considéré dans ces conditions hydrologiques comme une barrière totale au sens du protocole ICE (Classe ICE = 0). Il convient toutefois de poursuivre l'analyse (aller en 3) afin d'apprécier la classe de franchissabilité dans le cas où des conditions hydrologiques différentes permettraient d'assurer une charge suffisante. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il est dès lors possible d'apprécier l'utilité de revenir décrire l'obstacle dans d'autres conditions hydrologiques.

Attention. Pour les espèces sauteuses et dans le cas des petites chutes, la distance horizontale parcourue par le poisson en saut, lui permet généralement de tomber directement dans la retenue amont. Dans cette zone assez profonde, les vitesses d'écoulement sont généralement réduites et compatibles avec une reprise de nage des individus. Ceci est d'autant plus vrai que l'épaisseur de la crête du seuil est réduite. Aussi, dans le cas où la hauteur de chute à franchir $DH \leq DH_{\text{min}}$ (voir hauteur de chute de la classe ICE 1 du tableau 7) et que l'épaisseur de la crête du seuil est inférieure à la taille moyenne L_{moy} des poissons, il pourra être fait abstraction de ce critère de charge minimale H_{min} , en allant directement en 3.

3- Analyse de la fosse en pied d'obstacle

Si la profondeur de la fosse en pied d'obstacle $H_f \geq H_{f_{\text{min}}}$ (voir Tableau 8), alors la fosse est suffisante. Aller en 4.

Si $H_f < H_{f_{\text{min}}}$, l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale au sens du protocole ICE (Classe ICE = 0).

4- Espèces sauteuses

Dans le cas où l'espèce considérée ou le groupe d'espèces ciblées est sauteur (voir tableau 7), aller en 6.

Si Non, aller en 5.

5- Écoulements en jets de surface

Si $DH \leq 0,5H$, alors l'écoulement peut être considéré comme un jet de surface. Aller en 6.

Si $0,5H < DH \leq H$, alors l'écoulement peut être considéré comme à jet quasi de surface. L'ouvrage aura un impact dans tous les cas pour ces espèces. La classe ICE ne pourra en aucun cas excéder 0,66 ; aller en 6 et retenir la classe ICE du tableau 7 si elle est inférieure ou égale à 0,66 (sinon la classe ICE est donc 0,66).

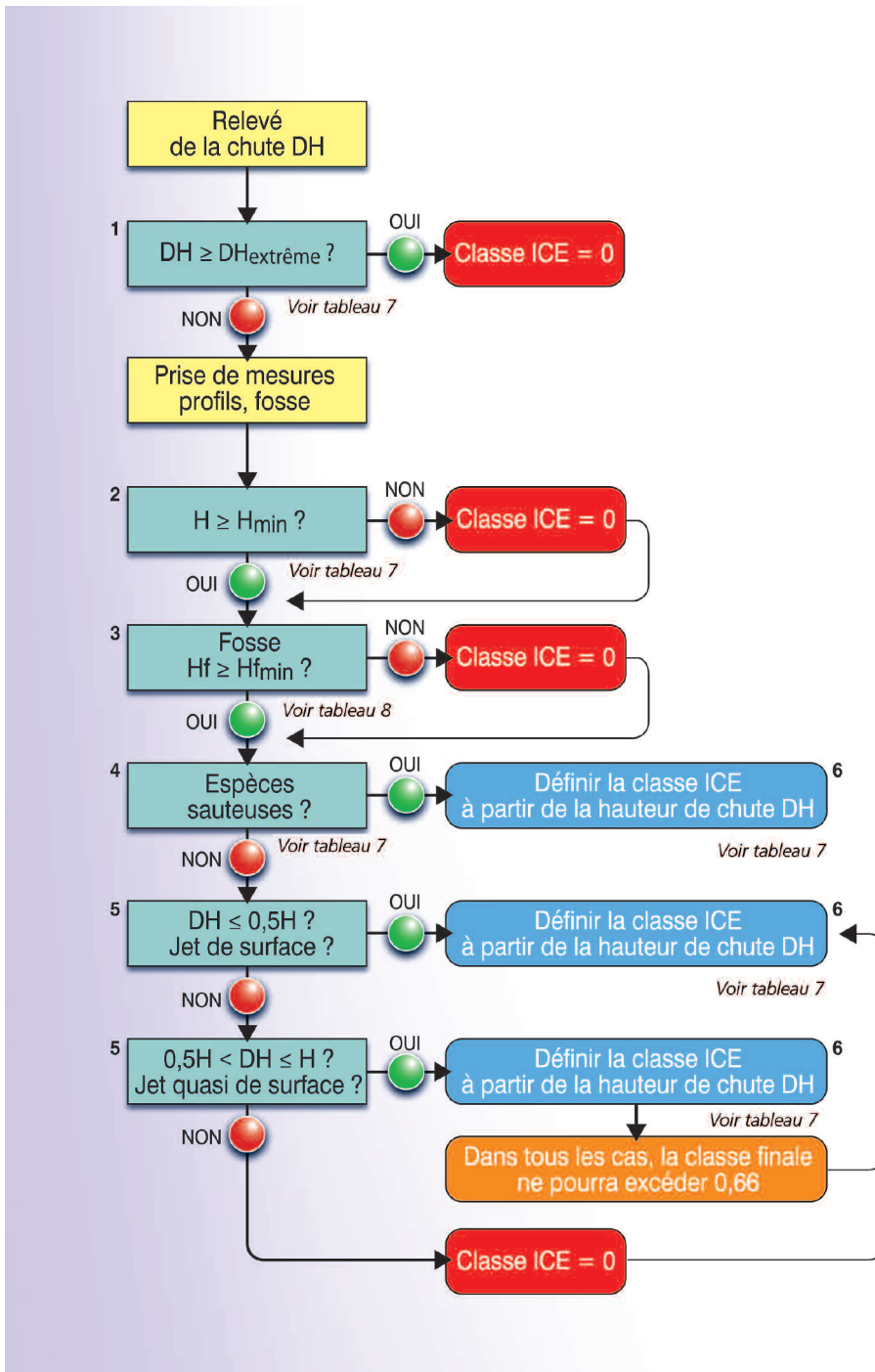
Si $DH > H$, l'écoulement est dit à jet plongeant et l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale au sens du protocole ICE (Classe ICE = 0).

NB Dans le cas où l'écoulement se trouve proche de la transition entre écoulement plongeant et écoulement de surface, il peut être intéressant de poursuivre l'analyse et d'aller en 6 afin d'apprécier sommairement la classe de franchissabilité pour des conditions hydrologiques plus favorables (passage en écoulement de surface par noyage aval). Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, l'utilité de revenir dans d'autres conditions hydrologiques peut dès lors être appréciée.

6- Analyse de la chute

A partir de la hauteur de chute DH , définir à partir du tableau 7, l'état de franchissabilité de l'ouvrage (Classe ICE).

Figure 55



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE au niveau d'un obstacle vertical ou quasi-vertical (pente >150 %).

Les seuils à parement aval incliné (pente $\leq 150\%$)

Les seuils présentant un coursier aval incliné peuvent permettre le passage des poissons par la nage. La franchissabilité dépend des caractéristiques de l'écoulement sur le coursier (tirants d'eau, vitesses) et de la distance à franchir. Ces caractéristiques doivent être mises en relation avec les capacités de nage et la morphologie des espèces ciblées (vitesse de nage U_{max} , endurance à cette vitesse maximale et hauteur du poisson).

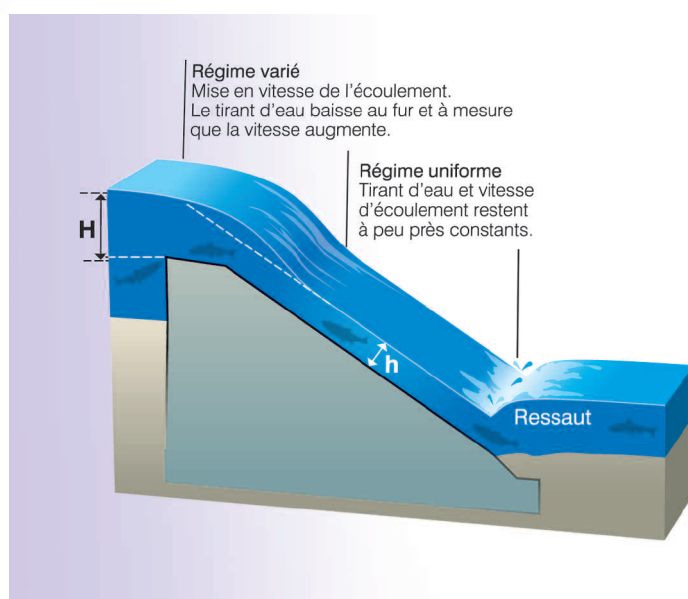
Critères de franchissabilité sur un seuil incliné uniforme

■ Les conditions d'écoulement

Les paramètres qui déterminent les caractéristiques de l'écoulement (vitesses V et tirants d'eau h) sur un coursier sont la pente du coursier (α), le débit par mètre de largeur (q) et la rugosité du coursier.

La vitesse de l'écoulement le long du coursier d'un seuil augmente vers l'aval jusqu'à ce que l'écoulement devienne uniforme, le tirant d'eau restant alors à peu près constant (Figure 56). La distance à partir de laquelle l'écoulement devient uniforme augmente avec le débit unitaire (débit par mètre de largeur) et diminue avec la rugosité du parement.

Figure 56



Évolution des conditions d'écoulement le long d'un coursier de seuil incliné.

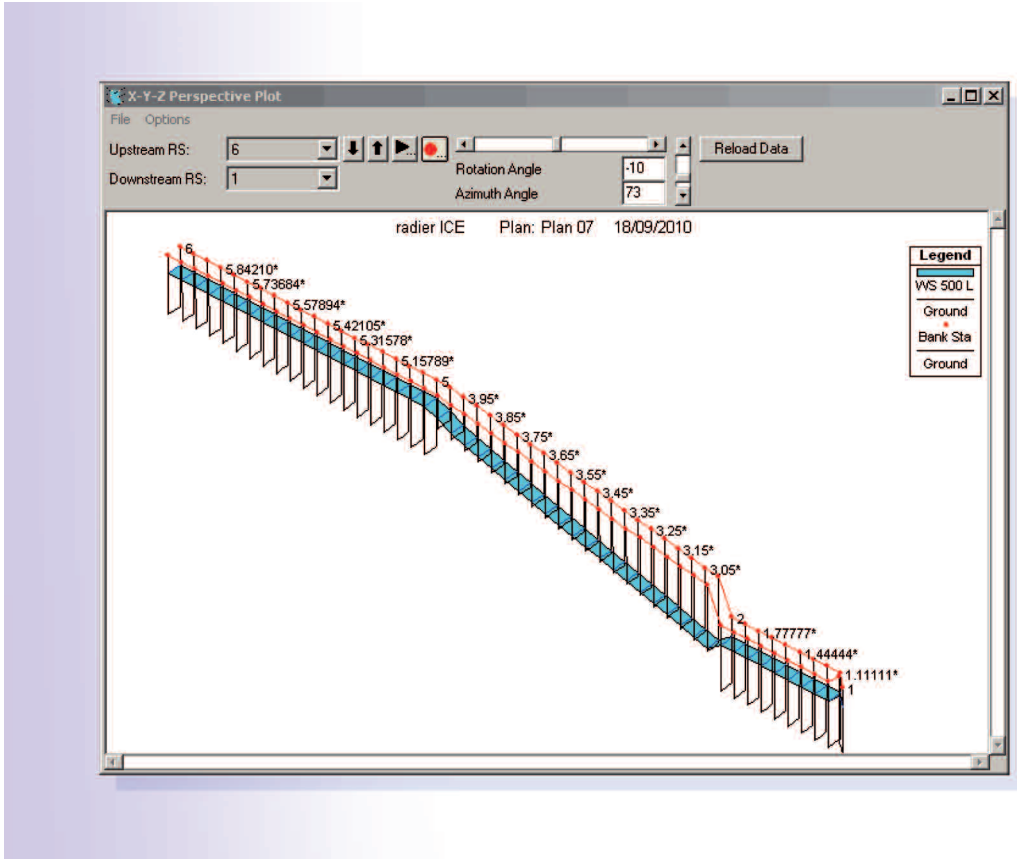
Afin d'analyser l'évolution des conditions d'écoulement dans le cas le plus simple d'un seuil caractérisé par un coursier ayant une pente régulière sans rupture de pente (redan), les modélisations hydrauliques des conditions d'écoulement ont été effectuées à l'aide du logiciel HEC-RAS développé par *US Army Corps of Engineers*.

Les analyses ont été conduites sur un seuil permettant de rattraper une chute de 5 m (Figure 57) en faisant varier différents paramètres physiques et hydrauliques pouvant influencer les conditions d'écoulements, à savoir :

- la pente du coursier. Au total, sept pentes ont été testées : 3% (1,7°), 6% (3,4°), 12% (6,8°), 25% (14°), 50% (26,6°), 100% (45°) et 150% (56°) ;
- la longueur du coursier. La longueur a été adaptée en fonction de la pente pour assurer la chute fixe de 5 m de hauteur ;

- la rugosité du coursier. Pour prendre en compte les diverses rugosités du coursier, sept coefficients de Manning-Strikler (n) ont été testés : 0,010 (substrat très lisse équivalent à un coursier en béton taloché) ; 0,015 ; 0,020 ; 0,030 ; 0,040 ; 0,050 et 0,060 (très forte rugosité équivalent à des maçonneries grossières) ;
- le débit unitaire ou débit par mètre de largeur. Sept débits unitaires ont été testés : 125, 250, 500, 750, 1000, 1500 et 2000 L/s/m.

Figure 57



Extrait graphique d'une modélisation hydraulique effectuée sous HEC RAS.

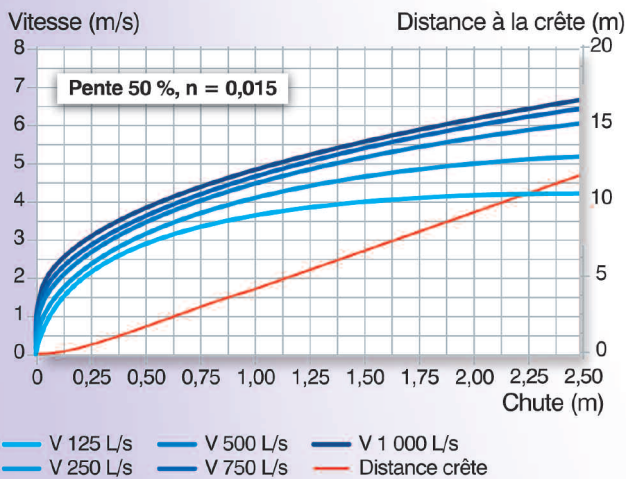
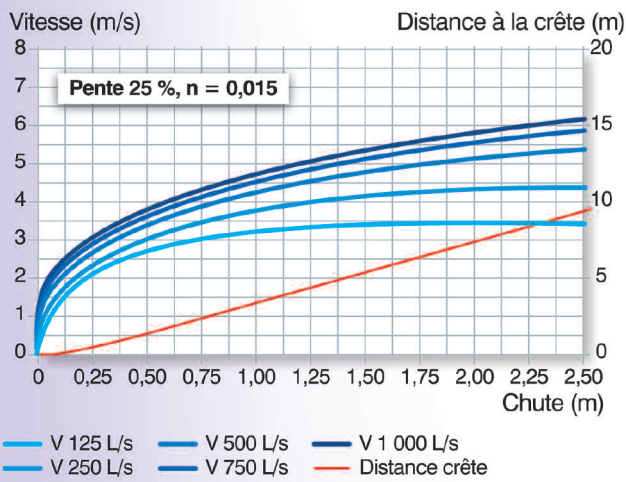
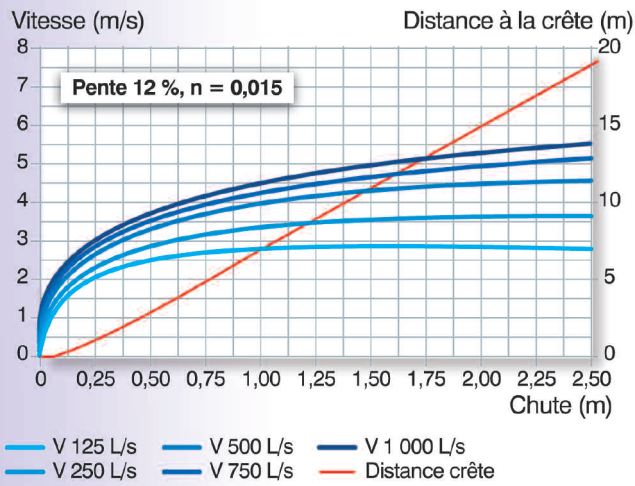
L'évolution des vitesses le long du coursier pour les différents débits unitaires considérés a été extraite de la modélisation hydraulique et portée graphiquement en fonction de la distance à la crête (ou de la chute) et cela pour les différents couples pente/rugosité considérés.

A l'issue des modélisations hydrauliques, une cinquantaine de graphiques a été établie (Figure 58).

Ces graphiques mettent en évidence :

- l'accélération de l'écoulement depuis la crête jusqu'à une distance à partir de laquelle l'écoulement devient uniforme (vitesses et tirants d'eau constants) ;
- une vitesse atteinte d'autant plus élevée que le débit unitaire est important ;
- une distance à partir de laquelle l'écoulement devient uniforme, augmentant avec le débit unitaire et diminuant avec la rugosité.

A titre d'exemple, sur le premier graphique de la figure 58, pour un seuil à 12% de pente présentant un coefficient de Manning égal à 0,015, il peut être observé que pour un débit unitaire de 125 l/s/m, la vitesse augmente progressivement pour se stabiliser à une valeur de l'ordre de 2,8 m/s à environ 7 m de la crête du seuil. Pour un débit unitaire plus conséquent de 500 l/s/m, l'écoulement ne devient uniforme qu'à une distance de l'ordre de 11 m de la crête. A cette distance, la vitesse devient constante et voisine de 4,5 m/s.



Représentation graphique montrant la relation entre la vitesse d'écoulement, la chute et la distance à la crête en fonction du débit unitaire (125 L/s/m à 1000 L/s/m) pour une pente donnée (12%, 25% et 50%) et une rugosité donnée du coursier (Manning $n=0,015$).

■ Modélisation de la franchissabilité piscicole

Les capacités de nage sont exprimées en termes de vitesse maximale de nage (U_{max}) et d'endurance (t) à cette vitesse maximale.

Le temps nécessaire (d_t) pour qu'un poisson nageant à la vitesse (U_{max}), situé à une distance x de la crête où la vitesse de l'écoulement est $V(x)$ pour franchir une distance dx est :

$$d_t = \frac{dx}{(U_{max} - V(x))}$$

L'endurance requise $t(D)$ pour franchir une distance D à partir de la crête peut s'exprimer par :

$$t(D) = \int_0^D \frac{dx}{(U_{max} - V(x))}$$

Pour une distance à la crête donnée, cette intégration donne le temps nécessaire au poisson nageant à sa vitesse U_{max} pour parvenir au niveau de la crête du seuil, ou, ce qui est équivalent, la distance franchissable pour un individu possédant une vitesse maximale de nage (U_{max}) et une endurance donnée (t).

Ainsi, à partir des conditions hydrauliques obtenues par modélisation sur un seuil donné, et pour un débit unitaire donné, il est possible d'obtenir la distance franchissable par un poisson possédant une vitesse maximale de nage (U_{max}) et une endurance (t).

Les résultats ont été portés sous forme d'abaques donnant les chutes et distances franchissables pour des individus dont la vitesse maximale de nage varie de 2 m/s à 7 m/s en fonction de leur endurance à la vitesse maximale.

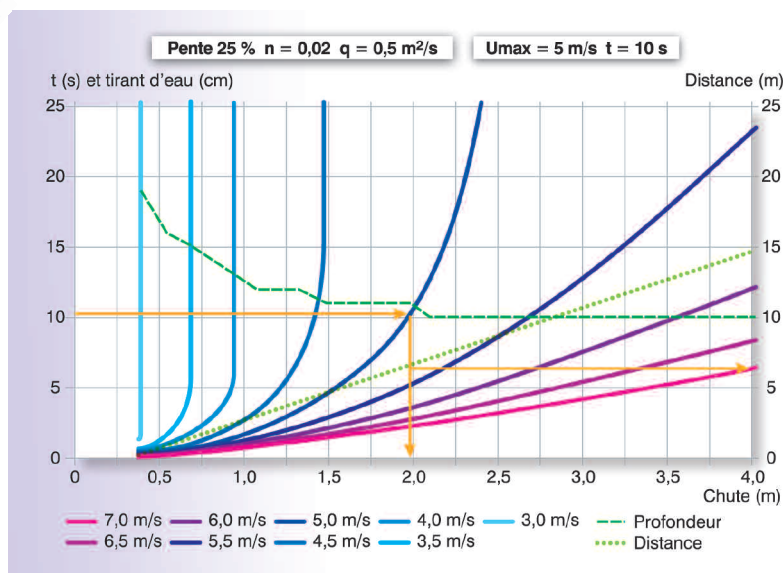
Les abaques ont été tracés pour 6 pentes (de 3% à 100%), 7 débits (de 0,125 m³/s/m à 2 m³/s/m), 7 rugosités (Manning n de 0,01 à 0,06), ce qui représente environ 300 abaques similaires à celle de la figure 59 et 3 000 relations endurance/chute franchissable.

Les distances franchissables obtenues grâce à ces abaques supposent évidemment que le tirant d'eau minimum (h_{min}) nécessaire pour assurer la nage des individus est assuré. Le même abaque donne l'évolution du tirant d'eau sur le coursier en fonction de la chute (ou de la distance à la crête). Il convient donc de vérifier que ce tirant d'eau n'est pas un facteur limitant pour la nage du poisson.

L'abaque présenté en figure 59 correspond à un seuil de pente 25%, à un coefficient de rugosité $n=0,020$ et un débit par unité de largeur de $q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Cet abaque indique par exemple, que pour un poisson ayant une vitesse maximale de nage de $U_{max} = 5 \text{ m/s}$ et une endurance de $t=10 \text{ s}$, la chute franchissable est légèrement inférieure à 2 m et la distance franchissable de l'ordre de 6,5 m. Le tirant d'eau sur le radier (courbe nommée "Profondeur" et indiquée en pointillé) varie de 20 cm à 10 cm environ en fonction de la distance à la crête, ce tirant d'eau se stabilisant à 7 m de la crête environ.

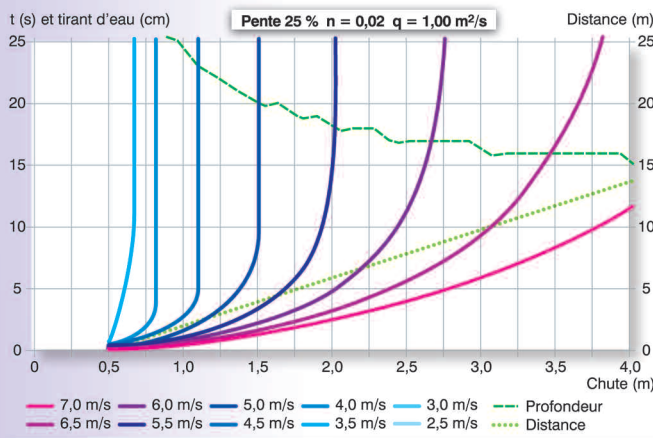
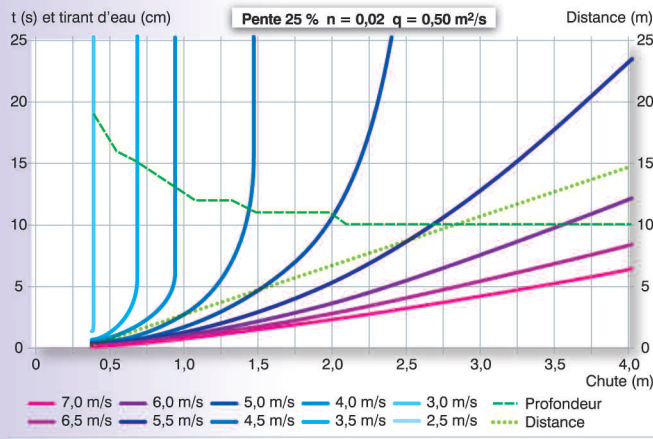
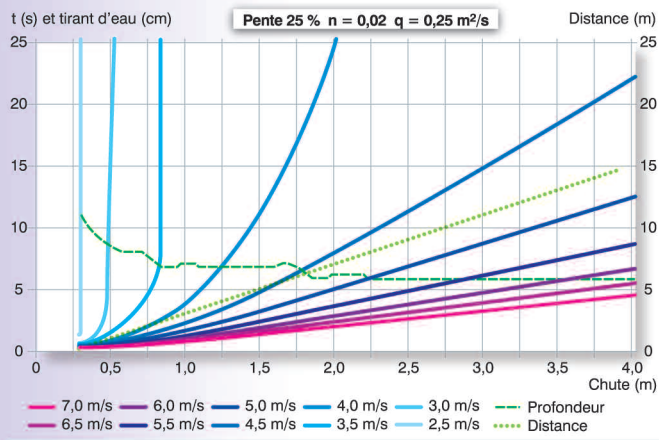
Figure 59



Relation entre chute franchissable, vitesse maximale de nage et endurance (pente = 25%, rugosité $n=0,020$, débit unitaire $q=0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$).

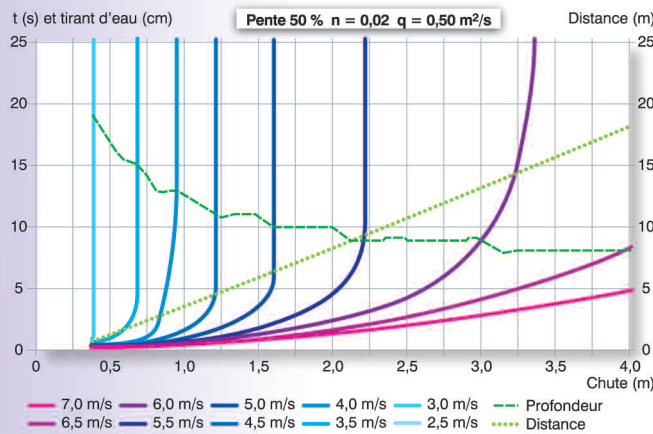
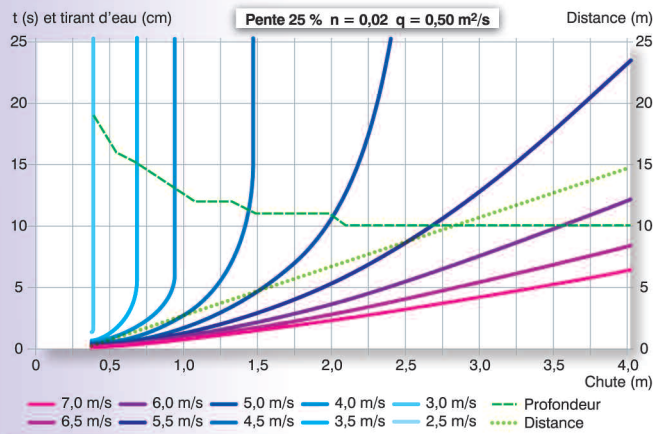
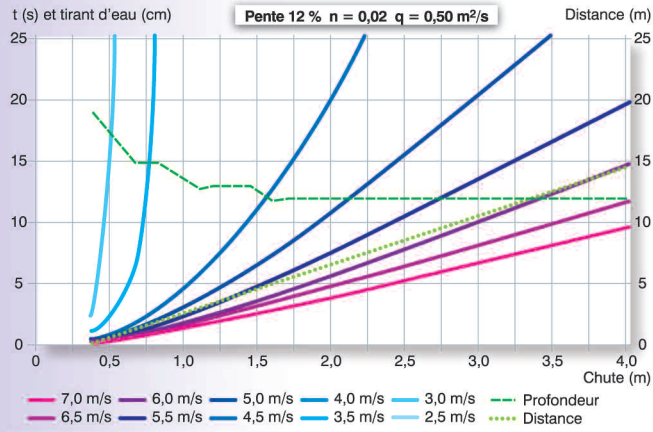
Les abaques présentés en figures 60, 61 et 62 permettent de visualiser l'influence du débit unitaire, de la pente du coursier et de la rugosité du coursier.

Figure 60

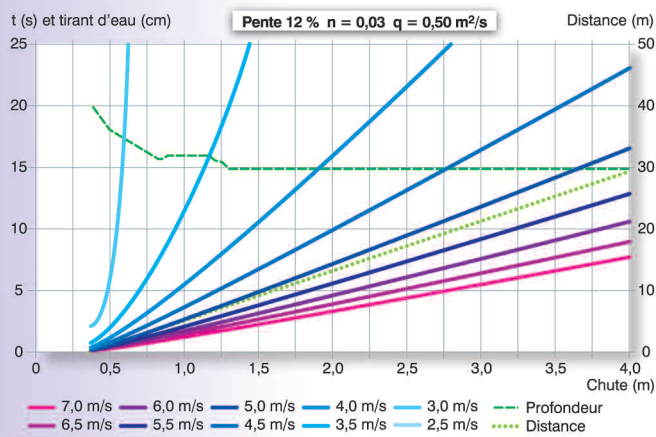
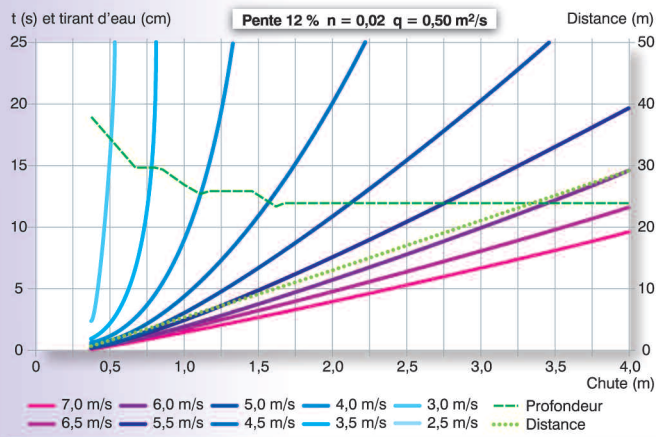
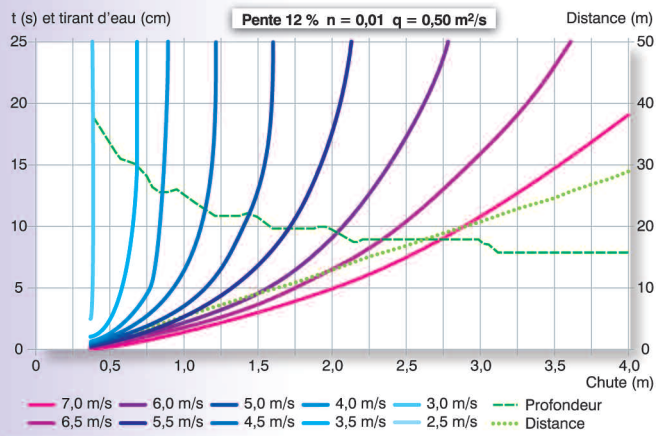


Evolution des chutes franchissables en fonction de la vitesse maximale de nage (U_{max}) et de l'endurance (t) pour un coursier donné (pente 25%, rugosité $n=0,020$). Les trois abaques correspondent à 3 débits unitaires différents ($q=0,25\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $0,5\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ et $q=1,0\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$).

Figure 61



Evolution des chutes franchissables en fonction de la vitesse maximale de nage (U_{max}) et de l'endurance (t) pour un débit unitaire donné ($q=0,5$ m³/s/m). Les trois abaques correspondent à des coursiers de différentes pentes (12%, 25% et 50%) présentant une rugosité constante ($n=0,020$).



Evolution des chutes franchissables en fonction de la vitesse maximale de nage (U_{max}) et de l'endurance (t) pour un débit unitaire donné ($q=0,5$ m³/s/m) et un coursier de pente constante (12%). Les trois abaques correspondent à des coursiers de rugosités variables ($n=0,010$, $n=0,020$ et $n=0,030$).

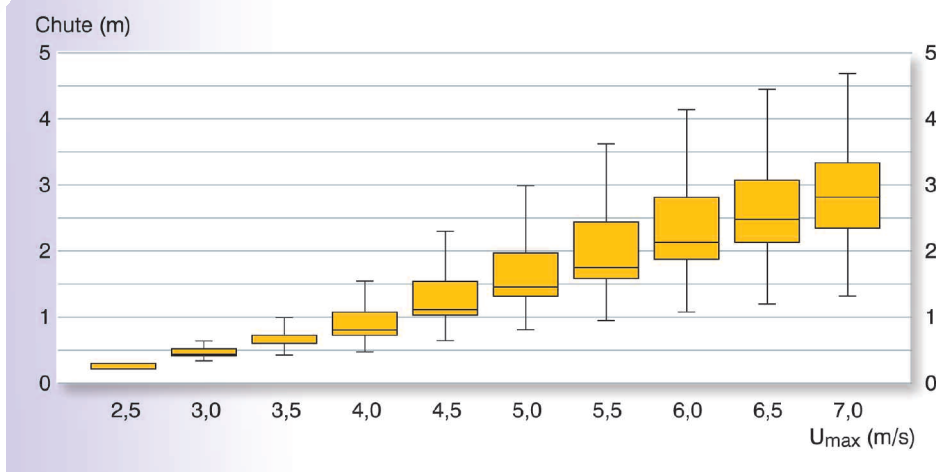
■ Analyse statistique des résultats

À partir de l'ensemble des résultats obtenus précédemment, une analyse des hauteurs de chute franchissables pour chaque groupe d'espèces a été effectuée en fonction des vitesses maximales de nage U_{max} , de la pente α , de la rugosité n , des débits unitaires q et des tirants d'eau h_{min} nécessaires. Pour ces analyses, il a été pris en compte des durées de poissons comprises entre 10 s et 20 s, endurance généralement associée à la vitesse de sprint des poissons et ce quelles que soient les espèces.

Il apparaît que pour des poissons nageant à une vitesse maximale U_{max} donnée (endurance de 10-20 s), la chute franchissable est dans une très large mesure déterminée par la vitesse maximale de nage du poisson (Figures 60 à 62). Les autres paramètres comme le débit unitaire, la rugosité, et plus particulièrement la pente, ont une influence beaucoup moins marquée.

Le graphique présenté en figure 63 représente sous forme de boîtes de dispersion, l'évolution de la chute franchissable en fonction de la vitesse de nage U_{max} du poisson (en considérant une endurance comprise entre 10 et 20 s) pour l'ensemble des conditions de pente, de débit unitaire et de rugosité testé.

Figure 63



Évolution des chutes franchissables en fonction de la vitesse maximale de nage du poisson (U_{max}), en considérant une endurance comprise entre 10s et 20s, et ce quels que soient les paramètres (pente, rugosité du coursier et débit unitaire).

■ Définition des classes de franchissabilité

En rapprochant les conditions hydrauliques (vitesses moyennes, tirant d'eau en fonction des débits unitaires et de la pente) sur le coursier et les capacités de nage des différentes espèces ou groupes d'espèces migratrices considérées (vitesses de nage associées à la classe de taille retenue L_{pmin} , L_{pmoy} et L_{pmax}), il devient possible de déterminer, pour chaque espèce ou groupe d'espèces, la classe de franchissabilité ICE correspondant à un seuil à parement aval incliné en fonction de sa hauteur de chute, définie comme la différence entre plans d'eau amont et aval de part et d'autre du seuil.

Pour une espèce donnée, il est alors possible d'associer une hauteur maximale de chute franchissable aux trois tailles d'individus retenues (L_{pmin} , L_{pmoy} et L_{pmax}).

En adoptant la même démarche que celle utilisée pour les seuils verticaux (pente >150%), et à partir de ces hauteurs maximales franchissables, il a été choisi de retenir la classification suivante (à condition bien évidemment que le tirant d'eau sur le seuil et la profondeur de fosse soient suffisants) :

- si la hauteur de chute DH est franchissable pour les poissons présentant la taille minimale L_{pmin} de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une barrière à impact limité (**Classe ICE = 1**) ;
- si la hauteur de chute DH est comprise entre les hauteurs franchissables par les poissons présentant les tailles minimale L_{pmin} et moyenne $L_{p_{moy}}$ retenues de l'espèce considérée, alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière à impact significatif (**Classe ICE = 0,66**) ;
- si la hauteur de chute DH est comprise entre les hauteurs franchissables par les poissons présentant les tailles moyenne $L_{p_{moy}}$ et maximale $L_{p_{max}}$ retenues de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une barrière à impact majeur (**Classe ICE = 0,33**) ;
- si la hauteur de chute DH n'est pas franchissable pour les individus présentant la taille maximale $L_{p_{max}}$ de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (**Classe ICE = 0**).

Ces valeurs limites de chute entre classes ICE sont similaires à celles obtenues pour les seuils à parements verticaux ou quasi-verticaux.

Redans sur le seuil

Un redan est un décrochement dans le parement du seuil venant briser la continuité du profil du seuil. Un seuil en gradin (profil en "escalier") ou la présence d'une rehausse en crête de seuil peut être pris pour exemple (Figure 64).

La présence d'un ou plusieurs redans sur un seuil, en particulier en condition de bas débit, peut singulièrement dégrader les conditions de franchissement de cet ouvrage. Le degré de blocage est fonction du type d'écoulement induit par le ou les redans.

Figure 64



Exemples de redans au niveau d'un seuil incliné. (a) Succession de redans, (b) Redan en amont d'un seuil incliné.

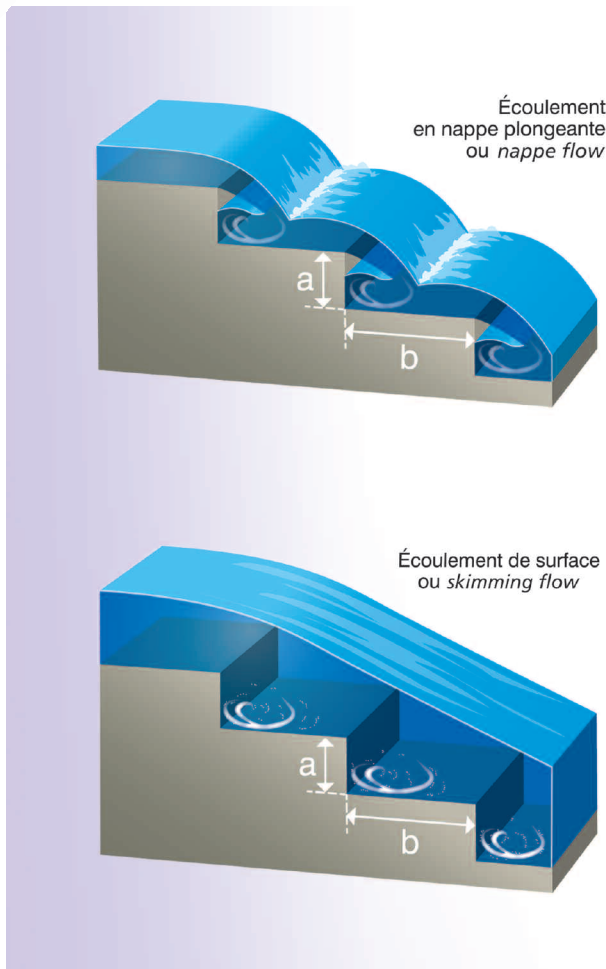
Un redan peut induire deux types d'écoulement (Figure 65) :

- un écoulement en nappe (*nappe flow*), où la lame d'eau chute sur la partie horizontale du redan avec formation d'un ressaut hydraulique ;
- un écoulement de surface (*skimming flow*), où le débit est alors suffisant pour "effacer" le redan.

Un redan est caractérisé par sa hauteur (a) et sa longueur horizontale ou quasi horizontale (b).

La transition entre les deux formes d'écoulement est fonction des caractéristiques géométriques du redan (longueur b et hauteur a) et du débit unitaire (q). Cette transition s'effectue pour des débits d'autant plus importants que la hauteur du redan (a) est importante.

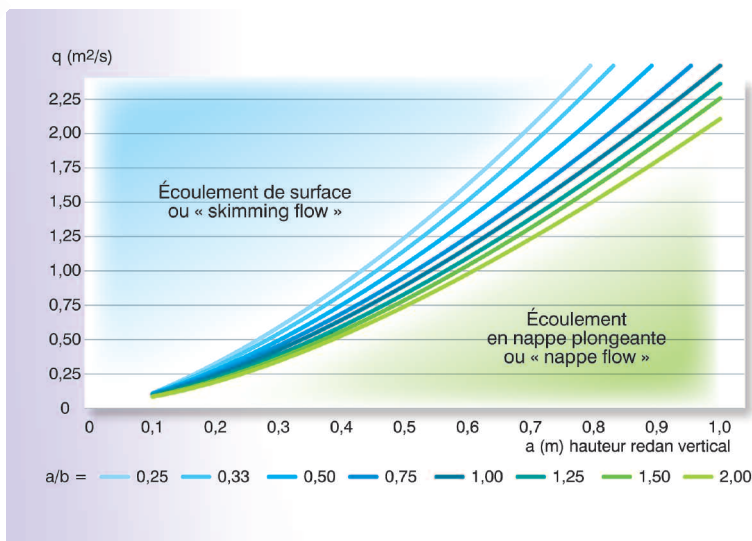
Figure 65



Écoulements en nappe plongeante (ressaut) et écoulements de surface au niveau de redans.

La figure 66 présente, pour des hauteurs de redan comprises entre 0,1 et 1 m et des rapports a/b variant entre 0,25 et 2, les débits unitaires de transition entre les deux formes d'écoulement.

Figure 66



Transition entre un écoulement avec ressaut et un écoulement de surface en fonction du débit unitaire et des caractéristiques du redan.

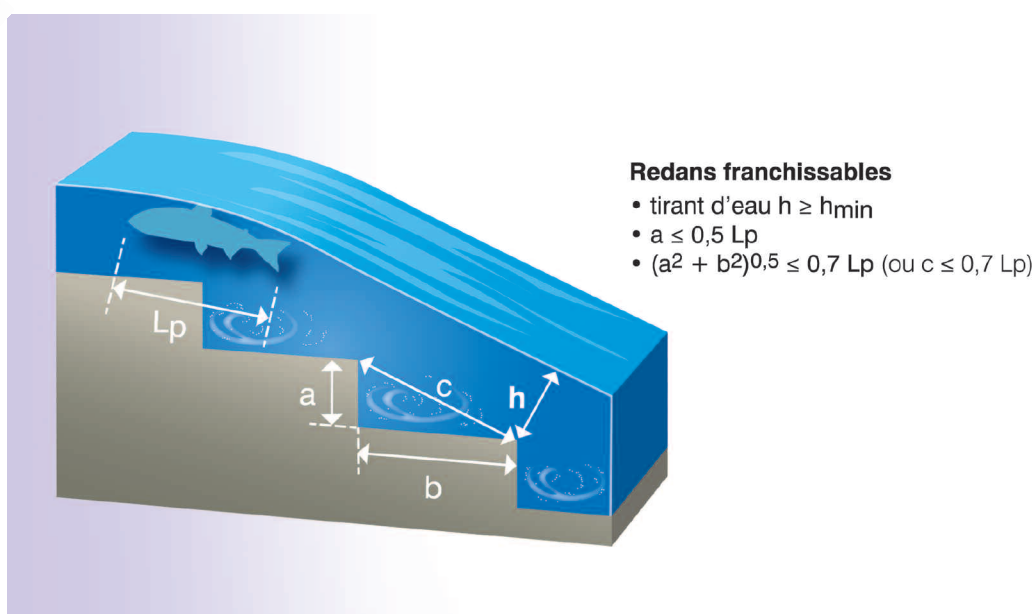
Le poisson ne peut franchir un redan que par la nage, c'est à dire lorsque le redan est effacé et que l'écoulement s'apparente à un écoulement de surface.

Il a donc été considéré qu'un poisson ne peut franchir un redan que si les conditions suivantes sont remplies (Figure 67) :

- l'écoulement est de type *skimming flow* ;
- la longueur du poisson ($L_{p_{min}}$ de l'espèce) est suffisante par rapport aux dimensions du décrochement. Il faut alors vérifier les deux dimensions suivantes
 $a \leq 0,5 L_{p_{min}}$ et $(a^2+b^2)^{0,5} \leq 0,7 L_{p_{min}}$ ou $c \leq 0,7 L_{p_{min}}$

En pratique, il suffit de vérifier la seconde condition puisque la première condition (écoulement de surface) est implicitement et grossièrement vérifiée dès lors que le tirant d'eau sur le radier est suffisant pour permettre la nage de l'espèce considérée, c'est à dire lorsque $h \geq h_{min}$.

Figure 67



Conditions nécessaires à respecter pour qu'un redan soit franchissable.

NB La position du redan sur le radier peut influencer le franchissement de façon différente en fonction de l'hydrologie du cours d'eau. Un redan situé en partie supérieure de seuil peut avoir un impact plus important qu'un redan situé en aval, susceptible d'être noyé en conditions hydrologiques plus fortes.

Attention. Dans le cadre du protocole ICE, la présence d'un redan est considérée dès lors qu'une partie du seuil présente un coursier de pente supérieure à 150%, poursuivie en aval par un coursier à pente plus faible et inférieure à 150%. Dans le cas où le tirant d'eau sur le redan est supérieur à deux fois sa hauteur ($h \geq 2a$), ce redan sera considéré comme négligeable et sa présence ne sera pas prise en compte dans l'analyse de la franchissabilité.

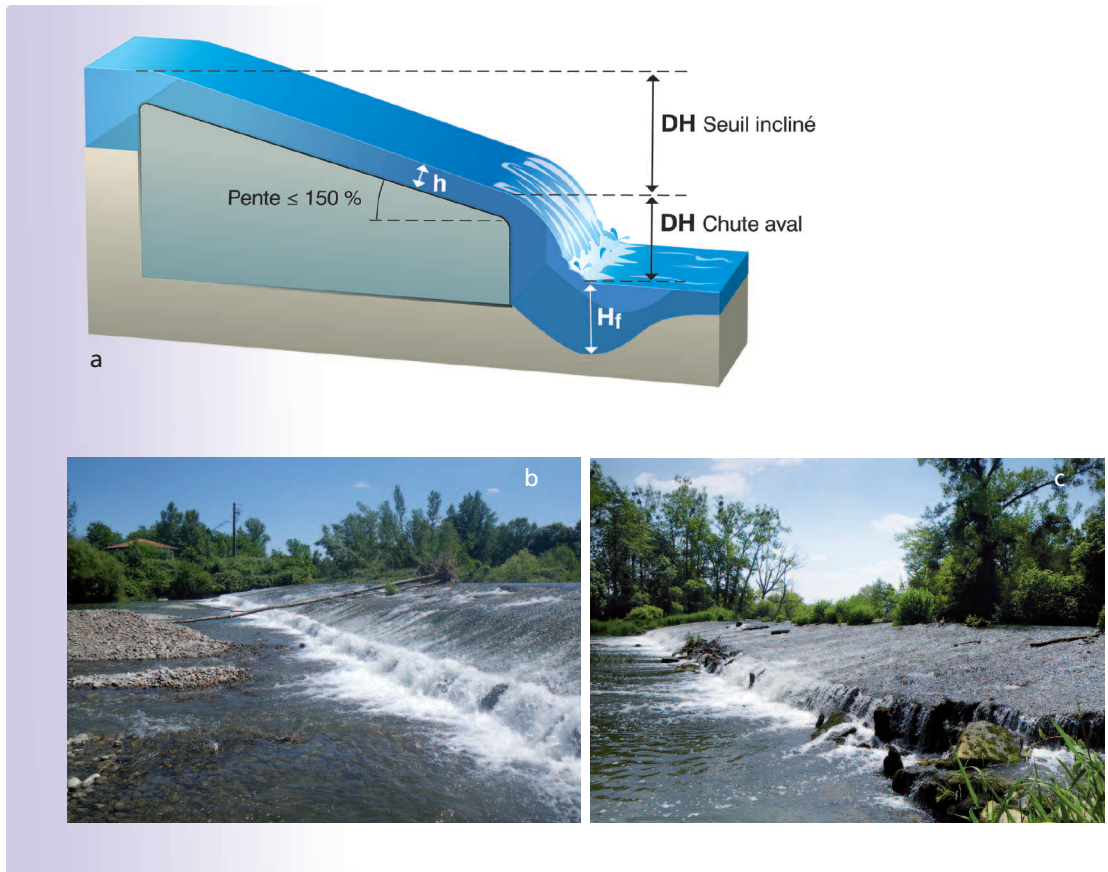
Présence d'une chute aval

Les seuils à parement incliné présentent souvent une chute à leur extrémité aval susceptible de réduire la franchissabilité de l'ouvrage (Figures 68).

La chute aval doit alors être analysée globalement comme un seuil à parement vertical (pente >150%).

La franchissabilité globale de l'ouvrage est déterminée à partir de la franchissabilité du seuil incliné et de la chute aval selon les règles définies dans le tableau 9 selon la même méthodologie que celle adoptée pour les ouvrages complexes ou mixtes (voir section spécifique aux ouvrages complexes).

Figure 68



a © Chansseau - Onema
b © Burgun - Onema

Exemples d'écoulement. (a) Schéma de principe d'un seuil incliné avec chute aval, (b, c) écoulement sur un parement incliné et présentant une chute aval.

Tableau 9

Matrice permettant de calculer la classe ICE finale d'un seuil à parement incliné présentant une chute aval.

Classe ICE du seuil incliné	Classe ICE de la chute aval			
	0	0,33	0,66	1
0	0	0	0	0
0,33	0	0	0,33	0,33
0,66	0	0,33	0,33	0,66
1	0	0,33	0,66	1
NC	0	NC (≤ 0,33)	NC (≤ 0,66)	NC

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Le tableau 10 (ci-contre) récapitule les dimensions des redans et les hauteurs de chute associées aux différentes classes de franchissabilité. Le tableau 11 (ci-dessous) présente les hauteurs de fosse minimales nécessaires H_{fmin} en fonction de la hauteur de chute et de l'angle d'incidence du jet (ou pente du coursier).

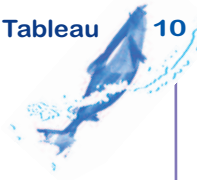
Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 69 pages suivantes) permettant de définir l'état de la franchissabilité selon le protocole ICE.

Tableau 11

Ordre de grandeur de la profondeur minimale de fosse (H_{fmin}) nécessaire pour permettre au poisson de franchir un obstacle à parement incliné (pente $\leq 150\%$).

Chute DH (m)	Inclinaison du jet (ou pente du parement du seuil)			
	$\leq 25\%$	]25% - 50%]	]50% - 100%]	]100% - 150%]
$\leq 0,25$	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,30 m
]0,25 - 0,50]	0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m
]0,50 - 1,00]	0,15 m	0,35 m	0,50 m	0,65 m
]1,00 - 1,50]	0,20 m	0,50 m	0,70 m	0,90 m
]1,50 - 2,00]	0,25 m	0,60 m	0,85 m	1,10 m
$> 2,00$	0,30 m	0,70 m	0,95 m	1,25 m

NB A noter que ces valeurs retenues pour les fosses d'eau sont à prendre comme des valeurs extrêmes permettant un franchissement potentiel. Dans les passes à poissons, des valeurs plus importantes sont systématiquement adoptées.



Synthèse de différents critères élémentaires (tirant d'eau, dimensions de redans et hauteur de chute) permettant de définir les classes de franchissabilité ICE de seuils à parement incliné (pente ≤ 150%) à l'aide de l'arbre de décision de la figure 69.

Groupe ICE	Espèces	Tirants d'eau minimum nécessaire pour la nage (h _{min} enroch)	Dimensions maximales des redans		Valeurs seuils de chute pour le diagnostic de seuil à parement incliné ≤ 160% (m)				DH extrême
			a _{max}	c _{max}	Classe ICE				
					1	0,66	0,33	0	
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	0,20 m	0,36 m	0,60 m	≤ 1,0]1,0 - 1,6]]1,6 - 2,6]	> 2,6	3,0 m
	Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)								
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0,10 m	0,20 m	0,30 m	≤ 0,8]0,8 - 1,1]]1,1 - 1,8]	> 1,8	2,5 m
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0,16 m	0,26 m	0,40 m	≤ 0,6]0,6 - 1,0]]1,0 - 1,4]	> 1,4	2,0 m
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	0,10 m	0,20 m	0,30 m					
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)		0,36 m	0,60 m					
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,10 m	0,20 m	0,30 m	≤ 0,6]0,6 - 0,9]]0,9 - 1,4]	> 1,4	2,0 m
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0,06 m	0,10 m	0,16 m	≤ 0,3]0,3 - 0,6]]0,6 - 0,8]	> 0,8	1,6 m
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>)	0,16 m	0,30 m	0,40 m	≤ 0,6]0,6 - 1,0]]1,0 - 1,4]	> 1,4	2,0 m
	Brochet (<i>Esox lucius</i>)								
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,10 m	0,16 m	0,26 m	≤ 0,4]0,4 - 0,76]]0,76 - 1,2]	> 1,2	1,6 m
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)	0,10 m	0,16 m	0,20 m	≤ 0,3]0,3 - 0,6]]0,6 - 0,9]	> 0,9	1,6 m
	Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)								
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	0,06 m	0,16 m	0,26 m					
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	0,26 m	0,26 m	0,40 m					
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>)	0,16 m	0,20 m	0,26 m					
	Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)								
8c	Brème bordelaise (<i>Blicca bjoerkna</i>)	0,10 m	0,16 m	0,20 m	≤ 0,2]0,2 - 0,6]]0,6 - 0,7]	> 0,7	1,6 m
	Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>)								
	Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>)								
	Perche (<i>Perca fluviatilis</i>)								
8d	Tanche (<i>Tinca tinca</i>)								
	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors idus</i>)	0,06 m	0,10 m	0,16 m					
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>)	0,06 m	0,06 m	0,10 m	≤ 0,16]0,16 - 0,36]]0,36 - 0,6]	> 0,6	1,0 m
	Ablette spirilin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>)								
	Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>)								
	Blageon (<i>Telestes souffia</i>)								
	Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>)								
	Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>)								
	Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>)								
	Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)								
Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)									
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>)								
	Chabots (<i>Cottus sp</i>)								
	Goujons (<i>Gobio sp</i>)								
	Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>)								
	Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>)								
	Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>)								
Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)									
10	Able de Heckel (<i>Leucaspius delineatus</i>)	0,06 m	0,06 m	0,06 m	≤ 0,1]0,1 - 0,2]]0,2 - 0,3]	> 0,3	1,0 m
	Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>)								
	Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>)								
	Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>)								
	Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)								
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,02 m	0,10 m	0,16 m	≤ 0,20]0,20 - 0,36]]0,36 - 0,6]	> 0,6	1,0 m
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-	-	-	1,0 m

(*) Les valeurs fournies pour l'anguille correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage de l'espèce. Dans le cas où l'obstacle présente une zone de reptation en complément, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à la reptation (voir section dédiée au cas particulier de l'anguille).

■ Arbre décisionnel

Pour définir l'état de franchissabilité d'un obstacle et sa classe ICE, la démarche est la suivante (Figure 69) :

1. Comparaison de la hauteur de chute DH avec $DH_{\text{extrême}}$

Si la chute totale $DH \geq DH_{\text{extrême}}$ (voir Tableau 10), l'ouvrage est totalement infranchissable pour l'espèce considérée ou le groupe d'espèces (Classe ICE = 0).

Si $DH < DH_{\text{extrême}}$, prendre toutes les mesures concernant l'ouvrage (profils en long, tirant d'eau, fosse).
Aller en 2.

2. Analyse de l'éventuelle chute aval

S'il existe une chute (pente > 150%) en aval du seuil incliné, il faut alors analyser la franchissabilité de la chute selon la procédure présentée à la section spécifique des obstacles verticaux ou quasi-verticaux (commencer l'analyse au point 4 *Espèces sauteuses* de l'arbre spécifique Figure 55).

Si la chute aval est totalement infranchissable pour l'espèce considérée ou le groupe d'espèces ciblé, alors la classe ICE de l'ouvrage est considérée comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

Si la chute aval n'est pas totalement infranchissable et quelle est prépondérante par rapport à la chute totale de l'obstacle ($DH_{\text{chute aval}} > DH_{\text{seuil incliné}}$), alors aller en 3a.

Sinon, aller directement en 3b.

3. Analyse de la fosse en pied d'obstacle

a) Si l'obstacle présente une chute aval prépondérante par rapport à la chute totale de l'obstacle ($DH_{\text{chute aval}} > DH_{\text{seuil incliné}}$), la profondeur de la fosse en pied de chute est alors vérifiée. Elle doit être suffisante selon la procédure relative aux chutes verticales > 150% (point 3), en considérant la hauteur de chute créée par la chute aval ($DH_{\text{chute aval}}$). Si $H_f \geq H_{f_{\text{min}}}$, (voir Tableau 8) alors la fosse est suffisante, et aller en 4.

b) Si l'obstacle ne présente pas de chute aval ou si la chute aval n'est pas prépondérante par rapport à la chute totale ($DH_{\text{chute aval}} < DH_{\text{seuil incliné}}$), alors vérifier la profondeur de la fosse en pied d'obstacle à partir du tableau 11 et en considérant la chute totale de l'obstacle ($DH = DH_{\text{seuil incliné}} + DH_{\text{chute aval}}$) et l'angle d'inclinaison du seuil. Si $H_f \geq H_{f_{\text{min}}}$ (voir Tableau 11) alors la fosse est suffisante, et aller en 4.

Si $H_f \leq H_{f_{\text{min}}}$, l'obstacle peut alors être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

4. Analyse du tirant d'eau sur l'obstacle

Si $h \geq h_{\text{min}}$ (voir Tableau 10), alors le tirant d'eau est suffisant. Aller en 5.

Si $h < h_{\text{min}}$, l'obstacle peut être considéré dans ces conditions hydrologiques comme une barrière totale au sens du protocole ICE (Classe ICE = 0). Il convient toutefois de poursuivre l'analyse (aller en 5) afin d'apprécier la classe de franchissabilité dans le cas où des conditions hydrologiques différentes permettraient d'assurer un tirant d'eau suffisant. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il est alors possible de déterminer d'ores et déjà l'utilité de revenir à d'autres conditions hydrologiques.

5. Analyse des redans sur le seuil à parement incliné

Si l'obstacle ne présente pas de redans ou si les redans sont considérés comme négligeables ($h \geq 2a$). Aller directement en 6.

Si les dimensions (a et c) d'un seul des redans présents dépassent les valeurs maximales de a_{max} et c_{max} fournies dans le tableau 10, alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

Si les dimensions (a et c) de chaque redan sont inférieures aux valeurs seuils, aller en 6.

6. Analyse de la chute DH du seuil à parement incliné

A partir de la hauteur de chute DH au niveau du seuil incliné (DH_{seuil incliné} ou DH s'il n'y a pas de chute aval), définir à partir du tableau 10, l'état de franchissabilité du seuil à parement incliné (Classe ICE).

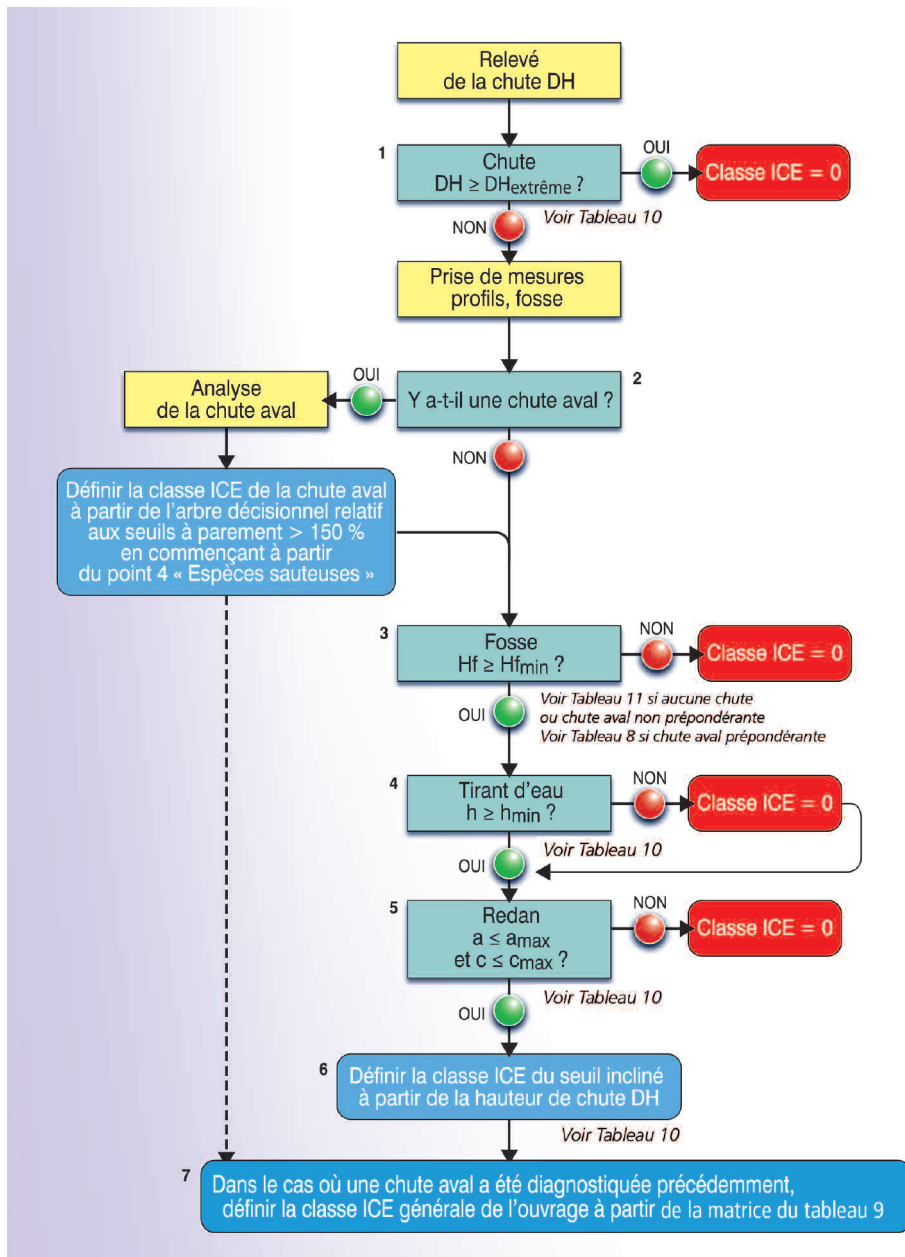
Puis aller en 7.

7. Analyse de l'état de franchissabilité générale de l'ouvrage.

Dans le cas où le seuil incliné présente une chute aval, définir la classe ICE générale de l'ouvrage à partir du tableau 9.

Si le site ne présente pas de chute aval, alors la classe ICE globale sera celle obtenue pour l'ouvrage à l'issue de l'étape 6.

Figure 69



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE au niveau d'un seuil à parement incliné (pente ≤ 150 %).

Le cas particulier des seuils en enrochements

Généralités

Les extractions massives de matériaux alluvionnaires dans les lits des cours d'eau effectuées en France dans les années 1960 - 1970 se sont traduites par un impact considérable sur l'équilibre des cours d'eau : abaissement des lits, érosion des berges, destruction des protections de berges, déstabilisation des fondations d'ouvrages d'art, abaissement du niveau des nappes. Un grand nombre de seuils de stabilisation en enrochements a été installé pour limiter l'incision des cours d'eau en stabilisant le lit en amont ou pour conforter des ouvrages d'art existants (Figure 70).

Des seuils en enrochements ont également été installés en remplacement de seuils partiellement effacés et au niveau desquels le maintien du profil en long du lit a été jugé nécessaire vis à vis des enjeux sociaux-économiques présents à l'amont.

Comme pour les seuils " traditionnels ", il est possible de rencontrer des seuils en enrochements présentant des configurations multiples et des hauteurs très variables allant de moins de 1 m à plus de 10 m.

Les blocs d'enrochements sont de dimensions très variables d'un site à l'autre ou même au sein du même ouvrage (de quelques dizaines de kg à plusieurs tonnes). Ces blocs sont généralement disposés les uns contre les autres et forment ainsi un coursier de pente plus ou moins importante, pouvant varier de 5% à plus de 30%.

Suivant la configuration des sites (physique, hydraulique), il est possible de rencontrer plusieurs types de disposition des enrochements (Figure 71 page suivante). Le seuil peut être constitué d'une ou plusieurs couches d'enrochements plus ou moins jointifs. Dans certains cas, notamment lorsque le franchissement des poissons a été pris en compte lors de la conception du site, la pente du coursier a pu être réduite et des gros blocs plus ou moins uniformément répartis ont pu être installés de manière à réduire les vitesses d'écoulement et offrir des zones de repos pour le poisson.

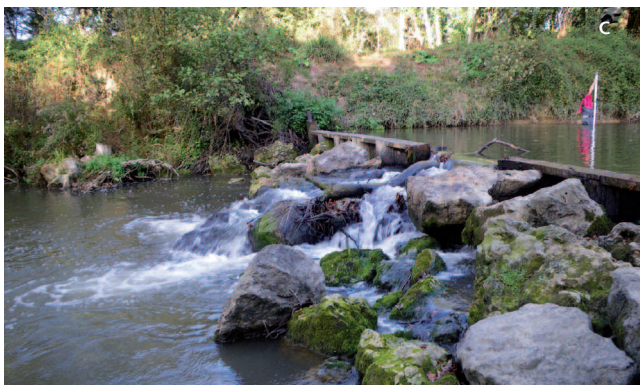
Figure 70



a, b © Larinier - Pôle Ecohydraulique

Exemples de seuils en enrochements.

(a) (b) Exemple de seuil en enrochements permettant de stabiliser le profil en long du lit au niveau d'un ouvrage d'art.



c

c, d © Voegtlté - Ecogea



d

(c) (d) Exemples d'enrochements protégeant les fondations d'un seuil des forces érosives.



e

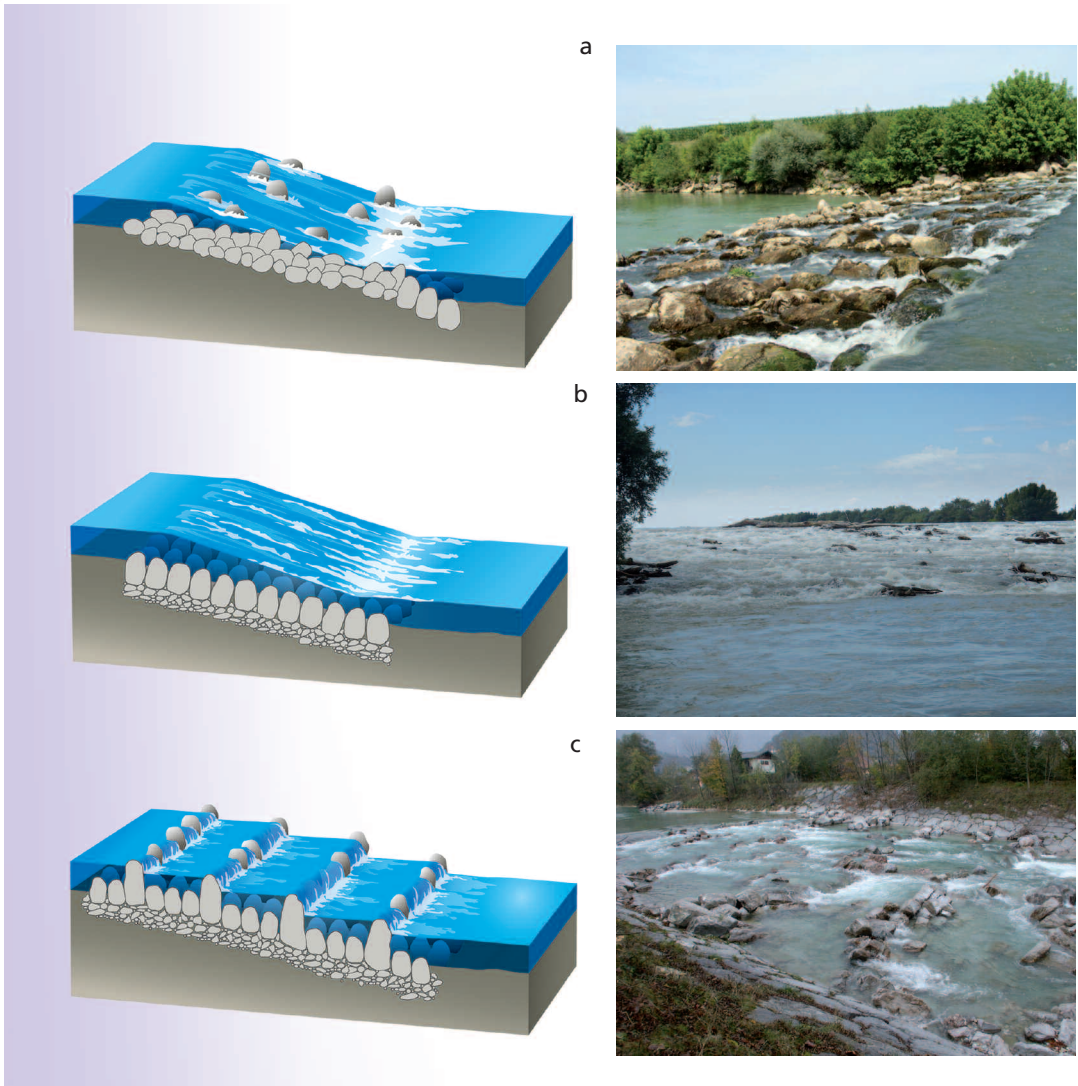
e © Voegtlté - Ecogea
f © Larinier - Pôle Ecohydraulique



f

(e) (f) Exemples de seuil de stabilisation de lit installés sur le gave de Pau et permettant d'éviter l'incision du lit.

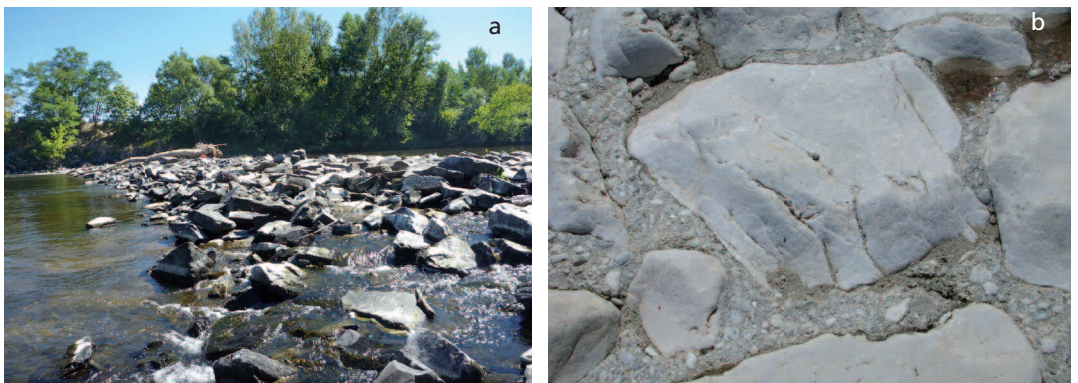
Figure 71



Exemples de dispositions diverses des enrochements.

Suivant les cas, les enrochements peuvent être soit laissés libres, soit jointoyés au béton ou au bitume (Figure 72). Dans le premier cas, si le transport solide en matériaux grossiers est significatif, les interstices les moins exposés peuvent se colmater au cours du temps.

72



Exemples d'enrochements libres (a) ou liaisonnés (b).

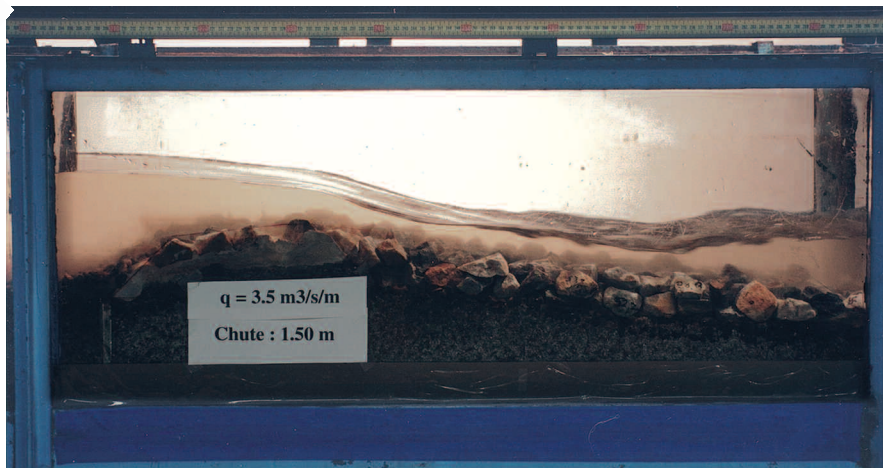
a, b, © Chanseau - Onema
c © Larinier - Pôle Ecohydraulique

a © Voegtli - Ecogea
b © Larinier - Pôle Ecohydraulique

Problématiques hydrauliques et piscicoles

Comme pour un seuil à parement incliné (voir section spécifique aux seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150\%$), la vitesse de l'écoulement augmente progressivement de la crête de la rampe vers l'aval jusqu'à ce que l'écoulement devienne uniforme, le tirant d'eau moyen restant alors à peu près constant tout au long du coursier (Figure 73). Plus le coursier est rugueux et le débit unitaire faible, plus la longueur d'établissement du régime uniforme est courte. Elle est de l'ordre de 3 à 4 mètres pour des débits unitaires de 1 à 2 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Figure 73



© tirée de Larinier et al. (2006)

Écoulement sur une rampe en enrochements jointifs de pente 10% (modèle échelle 1/22).

Les enrochements assurant une forte dissipation d'énergie tout au long du coursier, les phénomènes de ressauts hydrauliques en pied de seuil sont beaucoup moins marqués que pour les seuils classiques.

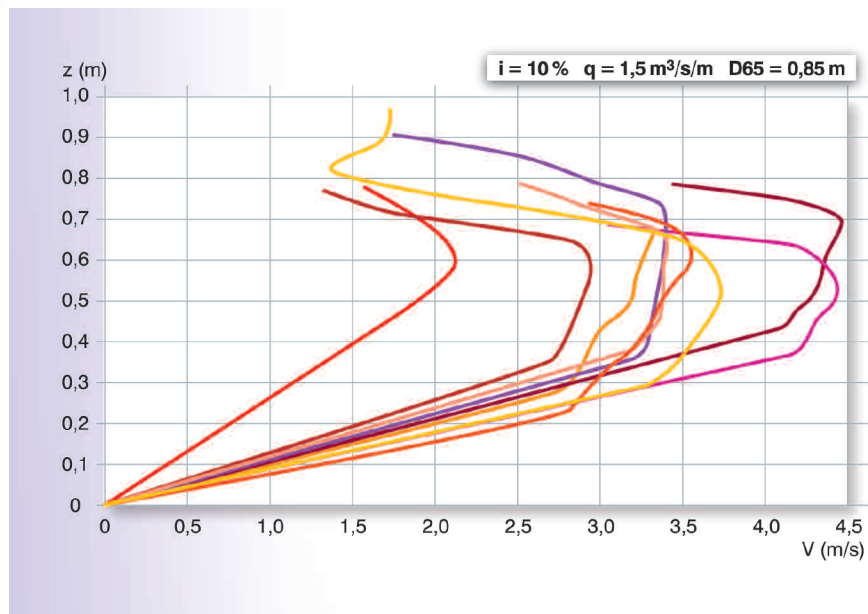
Les conditions d'écoulement (tirant d'eau, vitesses, formes d'écoulement) sont déterminées par la pente du coursier, la longueur du coursier (ou la chute), le débit unitaire et la rugosité de la paroi, qui dépend elle-même de la taille et de la forme des blocs, de leur agencement et de l'existence ou non d'un jointoiment.

L'analyse hydraulique au niveau des seuils en enrochements se révèle bien plus difficile que celle des seuils "classiques" étant donnée la variabilité du mode d'organisation, des formes et des dimensions des blocs, d'autant plus que leur mise en œuvre lors des travaux n'est jamais très précise.

Par ailleurs, compte tenu de la taille des blocs, il est impossible, comme dans le cas des seuils "classiques" (voir section spécifique aux seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150\%$), d'effectuer une analyse des conditions d'écoulement par modélisation hydraulique. En effet, les blocs constituent des rugosités dont les dimensions sont du même ordre de grandeur (voire plus importantes) que les profondeurs de l'écoulement, en particulier dans les conditions hydrologiques généralement rencontrées en période de migration du poisson.

A titre d'illustration la figure 74 reporte des profils de vitesses mesurés pour un débit unitaire de $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ sur une rampe en enrochements (blocométrie des blocs $D_{65} = 0,85 \text{ m}$) de pente 10%. Les profils relevés sur plusieurs verticales au droit d'une section à régime uniforme mettent en évidence une variabilité spatiale importante des profils de vitesse (les valeurs maximales étant comprises entre 2,1 m/s et 3,7 m/s) ainsi qu'un très fort gradient de vitesse sur la verticale.

Figure 74



© tirée de Larinier et al (2006)

Exemple de profils de vitesses sur une rampe en enrochements jointifs ($D_{65} = 0,85 \text{ m}$) à une pente de 10 %.

La franchissabilité d'un seuil en enrochements dépend des vitesses d'écoulement, des hauteurs d'eau (entre et/ou au-dessus des enrochements) suivant la taille de l'espèce concernée, de la " qualité " de la lame d'eau (absence de ressauts, de décollement de la lame d'eau...) ainsi que de la distance à franchir (Figures 75 et 76).

Deux facteurs sont limitants :

- pour les faibles débits unitaires, la lame d'eau est généralement déstructurée, la hauteur d'eau n'est pas suffisante pour permettre la nage du poisson, l'eau pouvant même s'infiltrer entre les enrochements ;
- lorsque le débit unitaire augmente, si la lame d'eau est mieux structurée, la vitesse de l'écoulement peut dépasser rapidement les capacités de nage de la plupart des espèces.

La plage de débits unitaires pour lesquels la rampe reste franchissable se réduit au fur et à mesure que la pente augmente, et ce quel que soit le groupe d'espèce.

Souvent, les seuils en enrochements n'offrent pas vraiment de zones de repos aux poissons de grande taille, et leur franchissement doit donc s'effectuer en une seule fois. Les blocs les plus protubérants peuvent éventuellement offrir des zones de repos aux plus petites espèces, à condition que l'agitation et la turbulence ne soient pas trop fortes (Figures 75 et 76).

Figure 75



Exemples d'écoulements sur des seuils en enrochements.

a © Voegtlé - Ecogea
b © Chanseau - Onema

Figure 76



Diversité de la qualité d'écoulements en enrochements.

a © Voegtlé - Ecogea
b © Larinier - Onema

Un diagnostic difficile

L'évaluation de la franchissabilité des seuils en enrochements est beaucoup plus délicate que celle des seuils "classiques", étant donné la complexité et la variabilité des écoulements (écoulements tridimensionnels).

Comme signalé précédemment, **la modélisation mathématique n'est pas pertinente**. Les lois d'hydraulique empiriques ne sont en effet pas applicables et il est difficile de définir des valeurs moyennes pour les paramètres comme la vitesse ou le tirant d'eau.

La modélisation physique en laboratoire peut être possible mais elle est généralement très délicate en raison notamment de la difficulté de réaliser un modèle réduit qui reflète la réalité au regard des fortes hétérogénéités des ouvrages. De plus, une telle modélisation physique n'est pas généralisable puisque ce qui est valable pour un site (dimension des enrochements, pente, débits unitaires, chute...) ne l'est pas forcément pour un autre. Enfin, elle nécessite des moyens humains et financiers très importants, totalement inenvisageables dans le cadre d'un protocole comme ICE.

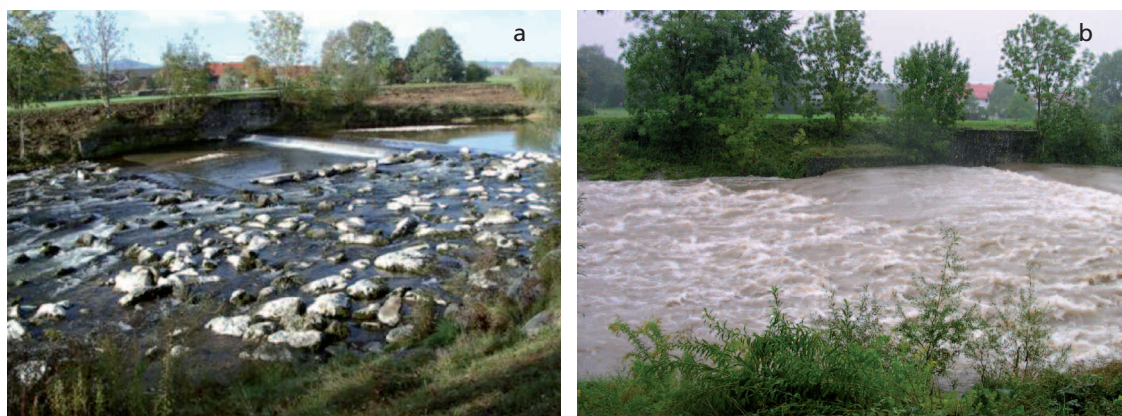
De même, **les évaluations biologiques *in situ* par marquage-recapture ou télémétrie sont délicates, très lourdes**, et limitées à quelques espèces (généralement de tailles importantes). Elles sont de plus difficilement transposables à d'autres sites.

Enfin, les mesures sur le terrain demeurent possibles dans certains cas, mais sont souvent très chronophages et peuvent présenter des risques pour les opérateurs. De plus, elles ne peuvent généralement pas être effectuées en eaux moyennes et fortes.

A titre d'exemple, Wang et Hartlieb (2011) ont cherché à analyser l'évolution des voies possibles de passage par les poissons (truite commune et petites espèces) au niveau d'un seuil sur la Schwaig en Bavière, équipé d'une passe naturelle en enrochements (longueur = 35 m ; largeur = 20 m ; pente = 4%). Les mesures ont consisté à relever sur la passe en enrochements, les vitesses d'écoulements à l'aide d'un courantomètre, les tirants d'eau et les largeurs possibles de couloir de migration (Figure 77).

Les mesures ont permis de constater la présence d'une singularité dans les voies de passage mais ont nécessité, pour un débit faible, des moyens humains très conséquents (2 jours de relevés à 4 personnes) et se sont révélées impossibles en eaux moyennes et fortes pour des questions de sécurité (Figure 77).

Figure 77



Mesures de terrain effectuées sur le seuil de Schwaig afin d'apprécier les voies de passages. (a) Seuil sur la Schwaig en basses eaux, (b) Seuil sur la Schwaig en fortes eaux.

© Wang

Critères et classes de franchissabilité

Compte tenu de l'impossibilité technique de réaliser des relevés précis sur ce type d'ouvrage et de réaliser des modélisations hydrauliques et physiques, il est apparu difficile de proposer des critères de franchissabilité.

Dans le cadre du protocole, il est proposé de vérifier dans un premier temps l'existence d'une voie de passage potentielle pour le poisson, puis d'apprécier l'état de franchissabilité à partir de deux critères simples à mesurer ou à estimer : la hauteur de chute DH et la pente moyenne du coursier.

Des critères de franchissabilité ont été extrapolés notamment de résultats issus de la modélisation physique en laboratoire des seuils " franchissables par conception " (Larinier et al., 1995), et plus récemment d'expérimentations sur les passes " naturelles " ainsi que des retours d'expérience acquis en France et à l'étranger.

■ Voie de passage avec tirant d'eau suffisant (h_{\min} enroch)

Comme pour le franchissement des seuils " classiques ", il est nécessaire que le poisson dispose d'un tirant d'eau suffisant pour lui permettre d'assurer pleinement sa propulsion par l'ondulation de son corps et de sa nageoire caudale.

Dans le cas des seuils " classiques ", le tirant d'eau critique (h_{\min}) nécessaire pour permettre au poisson de nager avait été considéré comme voisin de 1,5 fois la hauteur moyenne des individus de l'espèce et du stade concernés (h_{moy}).

Au vu de l'hétérogénéité des écoulements nettement plus marquée sur les seuils en enrochements, il est proposé ici de vérifier l'existence d'une voie potentielle de passage sur le seuil. **Cette voie de passage devra**

présenter sur l'ensemble de son linéaire un tirant d'eau suffisant et minimal ($h_{\min \text{ enroch}}$) permettant le passage par la nage de l'espèce considérée sans blocage (absence de ressauts hydrauliques ou de chutes brutales).

Plus la pente moyenne du coursier est importante, plus le débit unitaire (q) doit être important pour garantir un écoulement "cohérent" et "effacer" la succession de ressauts engendrés par les blocs d'enrochements. En effet, compte tenu de la dimension des blocs, lorsque les débits sont trop faibles, il est difficile de parler de "lame d'eau" sur le seuil et il s'agit plutôt d'un écoulement "en cascade" assimilable à une succession de redans. Le poisson ne peut alors progresser d'un palier à l'autre (de bloc en bloc) que si la hauteur et la disposition des blocs n'induisent pas localement de chutes infranchissables.

Pour prendre en compte cette spécificité, il est donc **proposé de retenir un tirant d'eau minimal nécessaire proportionnel à la pente**. Pour ce type d'ouvrages où l'accès est souvent délicat et les écoulements plus hétérogènes, cette condition ne pourra parfois être validée que visuellement ou alors ponctuellement à partir d'une ou plusieurs mesures aux zones limites.

Les valeurs de tirant d'eau minimal extrême pour les seuils en enrochements ($h_{\min \text{ enroch}}$) sont fournies dans le tableau 12.

A titre d'exemple, pour un saumon atlantique, le tirant d'eau minimal nécessaire devra être de 20 cm jusqu'à une pente de 9% (valeur de h_{\min} en du tableau 10) mais devra par contre être respectivement de 25 cm, 30 cm et 35 cm pour des pentes de 10%, 12% et 14%.

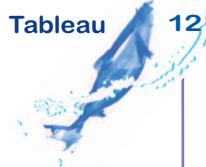


Tableau 12 Synthèse des tirants d'eau minimums extrêmes ($h_{\min \text{ enroch}}$) déterminés en fonction des pentes de coursier, permettant le franchissement des seuils en enrochements.

≤ 5%	]5% - 7%]	]7% - 9%]	]9% - 11%]	]11% - 13%]	]13% - 15%]
10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	40 cm

ou h_{\min} de l'espèce considérée (voir Tableau 10) si cette valeur est supérieure.

Ces valeurs retenues pour les tirants d'eau sont à prendre comme des valeurs minimales extrêmes permettant le franchissement. C'est pourquoi, dans la conception de passes à poissons et plus particulièrement de seuils en enrochements franchissables par conception ou de passes en enrochements, des valeurs plus importantes sont généralement adoptées (de l'ordre de 3 à 4 fois la hauteur des individus).

A noter par exemple que Larinier *et al.* (1995) préconisent pour les seuils en enrochements jointifs franchissables par conception, des hauteurs d'eau minimales de 30 cm pour les grands salmonidés migrateurs et les lamproies marines, 40 cm pour les aloses, 20 cm pour les truites communes, les cyprinidés rhéophiles et les petites espèces. De telles valeurs correspondent grossièrement à 2-3 fois le tirant d'eau minimal retenue (h_{\min}) pour les seuils "classiques", soit 3 à 4 fois la hauteur du poisson suivant les espèces.

■ Définition de l'état de franchissabilité par groupe d'espèces en fonction de la pente du seuil

Ces ouvrages, contrairement aux seuils "plus classiques", sont généralement caractérisés par des pentes modérées, mais présentent des longueurs qui peuvent parfois atteindre plusieurs dizaines de mètres.

En considérant un écoulement "cohérent" sur le coursier, c'est à dire présentant un tirant d'eau suffisant pour éviter la présence de ressauts infranchissables, la distance maximale franchissable pour une espèce donnée dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement (fonction de la rugosité du seuil, de sa pente et du débit) ainsi que des vitesses de nage de l'espèce considérée.

A partir de la formule de Rice *et al.* (1998), la vitesse moyenne de l'écoulement V_m peut être appréciée grossièrement en fonction de la pente du coursier en enrochements et du tirant d'eau :

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{v_m}{\sqrt{g \cdot h_m \cdot l}} = 2,21 \cdot \ln\left(\frac{h_m}{d_{84}}\right) + 6,00$$

avec :

V_m : vitesse moyenne de l'écoulement (en m/s)

h_m : tirant d'eau (en m)

d_{84} : diamètre des blocs d'enrochements constituant le seuil et dont le diamètre n'est pas dépassé sur 84% des blocs (en m)

l : pente du seuil (en m/m)

L'analyse de la franchissabilité d'un coursier en enrochements peut s'effectuer grossièrement d'une manière analogue à celle utilisée pour les seuils à parement aval incliné (voir section spécifique aux seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150\%$) ou les ouvrages routiers ou ferroviaires (voir section spécifique sur ce type d'ouvrage), c'est à dire en analysant la distance franchissable par un poisson dans un écoulement de vitesse moyenne donnée.

En mettant en relation les vitesses d'écoulement V et la distance franchissable par un poisson dans un écoulement de vitesse donnée (voir section sur le principe de l'évaluation d'ouvrages routiers ou ferroviaires), il a été alors possible pour chaque espèce ou groupe d'espèce, d'apprécier une classe de franchissabilité (0, 0,33, 0,66 et 1) en fonction de la pente du coursier et de la hauteur de chute DH à franchir.

Les valeurs fournies par cette méthodologie sont comparables aux critères définis par Larinier *et al.* (1995 ; 2006) pour le dimensionnement de seuils franchissables par conception ou/et de passes " naturelles " en enrochements jointifs.

Cependant, de la même manière que pour les valeurs retenues pour les tirants d'eau minimums nécessaires au franchissement, la limite entre les classes de franchissabilité (et notamment la limite pour laquelle l'obstacle est considéré comme une barrière à impact limité Classe ICE = 1) se situe logiquement au-delà des critères sécuritaires définis pour les seuils franchissables par conception ou les passes naturelles, qui sont dimensionnés pour assurer le franchissement de tous les individus d'une espèce donnée.

Présence de redan

Le cas le plus fréquent est la présence d'un redan au niveau de la crête du seuil en raison de la mise en place d'un rideau parafouille (béton, palplanches).

Comme pour les seuils " classiques ", la présence d'un redan sur toute la largeur d'un seuil en enrochements, peut singulièrement dégrader les conditions de franchissement piscicole particulièrement en condition de bas débit (Figure 78).

Figure 78



Photos de seuils en enrochements avec redans.

Il est possible d'adopter les mêmes critères que pour les seuils classiques portant sur les dimensions (a et c) relatives du redan par rapport à la taille moyenne ($L_{p_{moy}}$) de l'espèce ou du groupe d'espèces cible.

NB Certains obstacles peuvent être considérés soit comme des seuils en enrochements équipés d'un redan important à l'amont, soit comme des seuils verticaux équipés d'une protection de pied. L'analyse peut être abordée indifféremment soit à partir des seuils "classiques", soit à partir des seuils en enrochements, le résultat final concernant le degré de franchissabilité devant être similaire. Pour ces obstacles mixtes, le lecteur peut également se reporter à la section spécifique traitant des ouvrages complexes.

La fosse aval

Hors épisode de crue, et contrairement au seuil plus "classique", l'énergie est dissipée progressivement sur le seuil de par la présence des enrochements.

Les conditions aval sont ainsi caractérisées par une quasi-absence de ressaut. La pente étant souvent par ailleurs limitée, il sera considéré que **la présence d'une fosse de profondeur notable n'est pas indispensable.**

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associés à l'arbre décisionnel

Le tableau 13 (pages suivantes) fournit les tirants d'eau minimums ($h_{\min \text{ enroch}}$) qu'il convient de vérifier en complément. Ce tableau reprend également les hauteurs et longueurs maximales admissibles en cas de présence de redans.

Les tableaux 14 et 15 (pages suivantes) présentent les hauteurs de chutes limites bornant les classes de franchissabilité d'un seuil en enrochements en fonction de la pente moyenne de l'ouvrage. Pour des questions de lisibilité, deux tableaux ont été établis (seuil de pente moyenne $\leq 9\%$ sur le tableau 14 et pente moyenne $> 9\%$ sur le tableau 15).

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (figure 79) présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité.

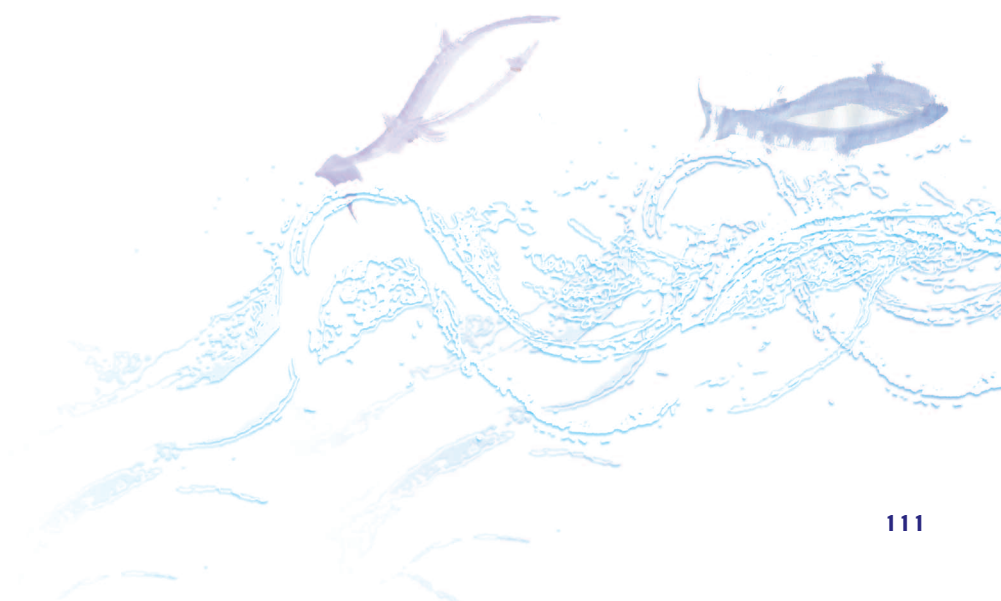


Tableau 13

Synthèse des valeurs de tirants d'eau minimums ($h_{\min \text{ enroch}}$) à vérifier pour valider l'existence d'une voie de passage cohérente sur les seuils en enrochements et dimensions maximales des redans (a_{\max} et c_{\max}).

Groupe ICE	Espèces	Dimensions maximales des redans		Valeurs seuils de tirants d'eau ($h_{\min \text{ enroch}}$) pour le diagnostic de seuils en enrochements						
		a_{\max}	c_{\max}	Pente $\leq 5\%$	5% <Pente $\leq 7\%$	7% <Pente $\leq 9\%$	9% <Pente $\leq 11\%$	11% < Pente $\leq 13\%$	13% < Pente $\leq 15\%$	Pente > 15%
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	0,35 m	0,50 m	0,20 m	0,20 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0,20 m	0,30 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0,25 m	0,40 m	0,15 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	0,20 m	0,30 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)	0,35 m	0,50 m							
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,20 m	0,30 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0,10 m	0,15 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	0,30 m	0,40 m	0,15 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,15 m	0,25 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>) Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	0,15 m	0,20 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	0,15 m	0,25 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	0,25 m	0,40 m	0,25 m	0,25 m	0,25 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>) Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)	0,20 m	0,25 m	0,15 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
8c	Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>) Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>) Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>) Perche (<i>Perca fluviatilis</i>) Tanche (<i>Tinca tinca</i>)	0,15 m	0,20 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors Idus</i>)	0,10 m	0,15 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette spirilin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	0,05 m	0,10 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>) Chabots (<i>Cottus sp</i>) Goujons (<i>Gobio sp</i>) Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>) Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>) Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>) Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)									
10	Able de Heckel (<i>Leucaspis delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnurus</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	0,05 m	0,05 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,10 m	0,15 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,40 m	-
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(*) Les valeurs fournies pour l'anguille correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage de l'espèce. Dans le cas où l'obstacle présente une zone de reptation en complément, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à la reptation (voir section dédiée au cas particulier de l'anguille).

Synthèse des valeurs seuils de hauteur de chute permettant de définir les classes de franchissabilité de seuils en enrochements (pour des pentes de seuil ≤ 9%) à l'aide de l'arbre de décision de la figure 79.

Groupe ICE	Espèces	Valeurs seuils de chute (DH) pour le diagnostic de seuils en enrochements (m)											
		Pente ≤ 5%			5% <Pente ≤ 7%				7% <Pente ≤ 9%				
		Classe ICE			Classe ICE				Classe ICE				
		1	0,66	0,33	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	-	-	-	-	-	-	-	≤ 6,4	> 6,4	-	-	
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	-	-	-	-	-	-	-	≤ 3,2	]3,2-8,0]	> 8,0	-
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	-	-	-	-	-	-	-	≤ 1,8	]1,8-4,4]	> 4,4	-
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)	-	-	-	-	-	-	-	≤ 1,8	]1,8-6,4]	> 6,4	-
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	-	-	-	-	-	-	-	≤ 1,8	]1,8-6,4]	> 6,4	-
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	-	-	-	≤ 3,0	> 3,0	-	-	≤ 1,0	]1,0-1,8]	]1,8-3,2]	> 3,2
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	-	-	-	-	-	-	-	≤ 3,2	]3,2-8,0]	> 8,0	-
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	-	-	-	-	-	-	-	≤ 1,8	]1,8-4,4]	> 4,4	-
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>) Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	-	-	-	≤ 3,0	> 3,0	-	-	≤ 1,0	]1,0-1,9]	]1,9-6,4]	> 6,4
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	-	-	-	≤ 3,0	> 3,0	-	-	≤ 1,0	]1,0-1,9]	]1,9-6,4]	> 6,4
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	≤ 0,3	]0,3-0,9]	]0,9-2,4]	≤ 0,3	]0,3-0,8]	]0,8-1,8]	> 1,8	≤ 0,2	]0,2-0,8]	]0,8-1,8]	> 1,8
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>) Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)	≤ 1,6	>1,6	-	≤ 1,0	]1,0-6,0]	> 6,0	-	≤ 0,5	]0,5-1,5]	]1,5-3,2]	> 3,2
8c	Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>) Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>) Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>) Perche (<i>Perca fluviatilis</i>) Tanche (<i>Tinca tinca</i>)	-	-	-	≤ 1,0	]1,0-6,0]	> 6,0	-	≤ 0,5	]0,5-1,5]	]1,5-3,2]	> 3,2
8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors Idus</i>)	-	-	-	≤ 1,0	]1,0-6,0]	> 6,0	-	≤ 0,5	]0,5-1,5]	]1,5-3,2]	> 3,2
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette spririlin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	-	-	-	≤ 0,4	]0,4-1,5]	> 1,5	-	-	≤ 0,7	]0,7-1,8]	> 1,8
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>) Chabots (<i>Cottus sp</i>) Goujons (<i>Gobio sp</i>) Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>) Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>) Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>) Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	Able de Heckel (<i>Leucaspis delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnurus</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	≤ 0,4	>0,4	-	-	≤ 0,4	]0,4-1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,5	> 0,5
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	≤ 0,4	]0,4-1,5]	> 1,5	-	-	≤ 0,7	]0,7-1,8]	> 1,8
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

(*) Les valeurs fournies pour l'anguille correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage de l'espèce. Dans le cas où l'obstacle présente une zone de reptation en complément, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à la reptation (voir section dédiée au cas particulier de l'anguille).

Tableau 15

Synthèse des valeurs seuils de hauteur de chute permettant de définir les classes de franchissabilité de seuils en enrochements (pour des pentes de seuil > 9%) à l'aide de l'arbre de décision de la figure 79.

Groupe ICE	Espèces	Valeurs seuils de chute (DH) pour le diagnostic de seuils en enrochements (m)												
		9% <Pente ≤ 11%				11% <Pente ≤ 13%				13% <Pente ≤ 15%				Pente > 15%
		Classe ICE				Classe ICE				Classe ICE				Classe ICE
		1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	0
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	≤ 4,0	[4,0-9,0]	> 9,0	-	≤ 2,4	[2,4-4,8]	[4,8-6,6]	> 6,6	≤ 0,9	[0,9-2,6]	[2,6-4,2]	> 4,2	> 0,0
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	≤ 2,6	[2,6-5,0]	[5,0-9,0]	> 9,0	≤ 1,8	[1,8-2,8]	[2,8-4,8]	> 4,8	≤ 0,2	[0,2-1,2]	[1,2-2,6]	> 2,6	> 0,0
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	≤ 1,8	[1,8-3,2]	[3,2-6,0]	> 6,0	≤ 1,1	[1,1-2,2]	[2,2-3,6]	> 3,6	-	≤ 0,6	[0,6-1,5]	> 1,5	> 0,0
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	≤ 1,0	[1,0-2,1]	[2,1-4,0]	> 4,0	≤ 0,5	[0,5-1,5]	[1,5-2,4]	> 2,4	-	-	≤ 0,9	> 0,9	> 0,0
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)													
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	≤ 1,0	[1,0-2,6]	[2,6-6,0]	> 6,0	≤ 0,4	[0,4-1,5]	[1,5-3,0]	> 3,0	-	-	≤ 1,0	> 1,0	> 0,0
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	≤ 0,5	[0,5-1,0]	[1,0-1,8]	> 1,8	-	≤ 0,4	[0,4-0,9]	> 0,9	-	-	-	> 0,0	> 0,0
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	≤ 1,8	[1,8-3,2]	[3,2-6,0]	> 6,0	≤ 1,1	[1,1-2,2]	[2,2-3,6]	> 3,6	-	≤ 0,6	[0,6-1,5]	> 1,5	> 0,0
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	≤ 1,0	[1,0-2,1]	[2,1-4,0]	> 4,0	≤ 0,5	[0,5-1,5]	[1,5-2,4]	> 2,4	-	-	≤ 0,9	> 0,9	> 0,0
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>) Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	≤ 0,5	[0,5-1,4]	[1,4-2,6]	> 2,6	-	≤ 0,6	[0,6-1,5]	> 1,5	-	-	-	> 0,0	> 0,0
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	≤ 0,5	[0,5-1,4]	[1,4-2,6]	> 2,6	-	≤ 0,6	[0,6-1,5]	> 1,5	-	-	-	> 0,0	> 0,0
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	-	≤ 0,8	[0,8-1,8]	> 1,8	-	≤ 0,2	[0,2-0,9]	> 0,9	-	-	-	> 0,0	> 0,0
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>) Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)	-	≤ 0,8	[0,8-1,8]	> 1,8	-	≤ 0,2	[0,2-0,9]	> 0,9	-	-	-	> 0,0	> 0,0
8c	Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>) Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>) Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>) Perche (<i>Perca fluviatilis</i>) Tanche (<i>Tinca tinca</i>)	-	≤ 0,8	[0,8-1,8]	> 1,8	-	≤ 0,2	[0,2-0,9]	> 0,9	-	-	-	> 0,0	> 0,0
8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors idus</i>)	-	≤ 0,8	[0,8-1,8]	> 1,8	-	≤ 0,2	[0,2-0,9]	> 0,9	-	-	-	> 0,0	> 0,0
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette spirilin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	-	≤ 0,3	[0,3-1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>) Chabots (<i>Cottus sp</i>) Goujons (<i>Gobio sp</i>) Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>) Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>) Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>) Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)													
10	Able de Heckel (<i>Leucaspis delineaatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	> 0,0
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	≤ 0,3	[0,3-1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	> 0,0

(*) Les valeurs fournies pour l'anguille correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage de l'espèce. Dans le cas où l'obstacle présente une zone de reptation en complément, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à la reptation (voir section dédiée au cas particulier de l'anguille).

■ Arbre décisionnel

Pour définir l'état de franchissabilité d'un obstacle et sa classe ICE, la marche à suivre est la suivante (Figure 79).

1. Analyse du tirant d'eau minimal sur la voie de passage

Si une voie de passage continue existe avec un tirant d'eau $h \geq h_{\min \text{ enroch}}$ (voir Tableau 13), alors le tirant d'eau est suffisant. Aller en 2.

Si $h < h_{\min \text{ enroch}}$, l'obstacle peut être considéré dans ces conditions hydrologiques, comme une barrière totale au sens du protocole ICE (Classe ICE = 0). Il convient toutefois de poursuivre l'analyse (aller en 2) afin d'apprécier la classe de franchissabilité dans le cas où des conditions hydrologiques différentes permettraient d'assurer un tirant d'eau suffisant. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il est alors possible de déterminer d'ores et déjà l'utilité de revenir à d'autres conditions hydrologiques.

2. Analyse des redans

Si le site ne présente pas de redans ou si les redans sont considérés comme négligeables ($h \geq 2a$). Aller directement en 3.

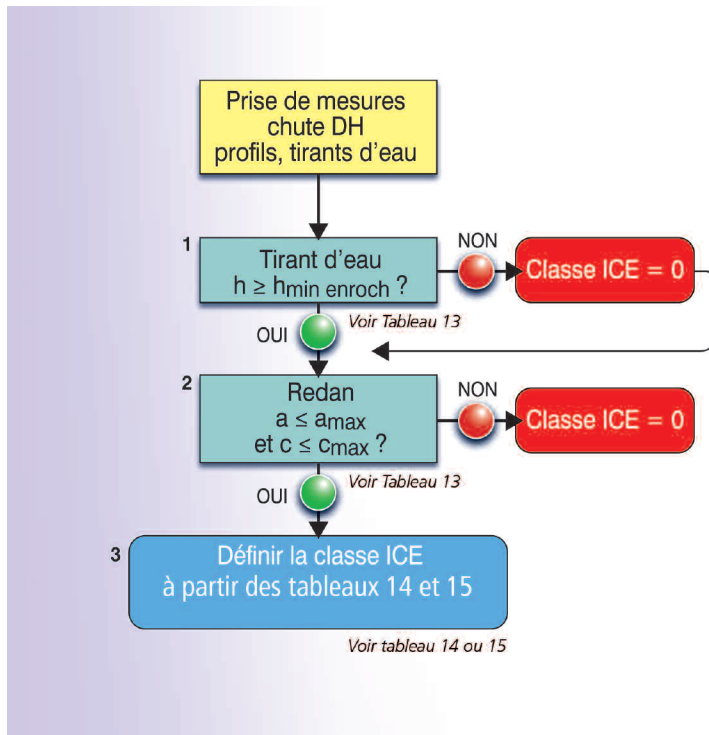
Si les dimensions (a et c) d'un seul des redans présents dépassent les valeurs maximales de a_{\max} et c_{\max} fournies dans le tableau 13, alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

Si les dimensions (a et c) de chaque redan sont inférieures aux valeurs seuils, aller en 3.

3. Analyse de la chute DH en fonction de la pente

A partir de la hauteur de chute DH et de la pente du seuil, définir en utilisant le tableau 14 ou 15, l'état de franchissabilité de l'ouvrage (Classe ICE).

Figure 79



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE au niveau d'un seuil en enrochements.

Cas des éléments mobiles d'un obstacle

Ecoulements par surverse

La problématique de la franchissabilité des vannes ou clapets déversants (Figure 80) n'est pas significativement différente de celle du franchissement des obstacles verticaux.

Aussi, la franchissabilité de tels ouvrages mobiles présentant des écoulements surversants doit être abordée de la même manière que pour les obstacles verticaux (voir section spécifique dédiée aux obstacles verticaux ou quasi-verticaux de pente > 150%).

Afin d'apprécier réellement la franchissabilité de ces ouvrages, il est nécessaire de bien connaître les modalités de gestion des ouvertures.

Figure 80



Photos d'écoulements au-dessus d'organes mobiles. (a) Seuil constitué d'un clapet déversant. (b) Ouvrage constitué d'une série de vannages.

a © Burgun - Onema
b © Richard - Onema

Écoulements par sousverse

Les critères de franchissabilité

Sur certains obstacles, notamment des seuils ou barrages équipés de vannes (vannes levantes verticales ou inclinées, vannes à segment...), l'évacuation du débit ou d'une partie du débit peut se faire par-dessous. Ces écoulements peuvent alors constituer des voies de passage potentielles pour le poisson.

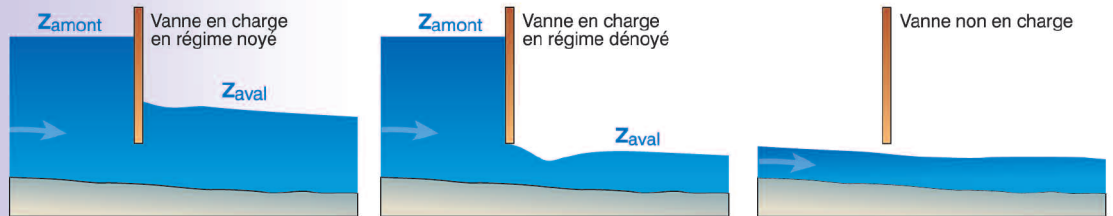
Bien que les vitesses d'écoulement soient très souvent bien supérieures aux capacités de nage des poissons, il est toutefois intéressant de disposer d'éléments permettant d'apprécier la franchissabilité de ces organes par les différents groupes d'espèces. Ces éléments sont d'autant plus importants dans le cas où l'ouvrage est constitué en majorité d'ouvrages mobiles.

■ Les différents types d'écoulements sous des organes mobiles

Dans le cas où la vanne est en charge, l'écoulement est comparable à l'écoulement à travers un orifice, l'ouverture étant complètement submergée (Figure 81a).

Dans le cas où, la vanne n'est pas en charge (Figure 81b), c'est-à-dire que le niveau d'eau en amont de la vanne (Z_{amont}) est au-dessous de la cote basse de la vanne, il n'y a plus de forte mise en vitesse et de contraction de l'écoulement comme dans le cas d'une vanne en charge. **L'écoulement est à surface libre et l'analyse de la franchissabilité est identique à celle pratiquée pour un seuil à parement incliné.**

Figure 81



a © Forgeois - Onema
b © Voegtli - Ecogea

Shémas et exemples de vannes en charge et non en charge. (a) Photo d'un écoulement sous vanne en charge, (b) Photo d'un écoulement au niveau d'une vanne qui n'est pas en charge.

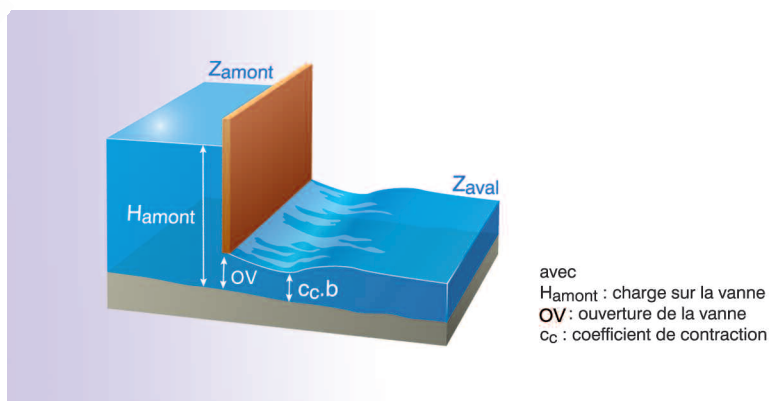
■ **Écoulements en charge noyés ou dénoyés.**

Écoulement dénoyé

De façon générale, dans le cas d'un écoulement en régime dénoyé (Figure 82), le niveau d'eau en aval de la vanne est globalement inférieur à la cote altimétrique du pied de la vanne. Le jet créé par l'écoulement qui passe par la vanne de fond de section S , est accéléré jusqu'à une section contractée S_c , où la vitesse d'écoulement est maximale et voisine de :

$$V_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\text{amont}}}$$

Figure 82



Écoulement sous vanne en régime dénoyé. Principe d'un écoulement sous vanne en régime dénoyé.

Dans le cadre du protocole ICE, l'appréciation de cette vitesse maximale dans le jet sera recherchée de manière à la confronter aux capacités de nage des espèces ou groupes d'espèces ciblées.

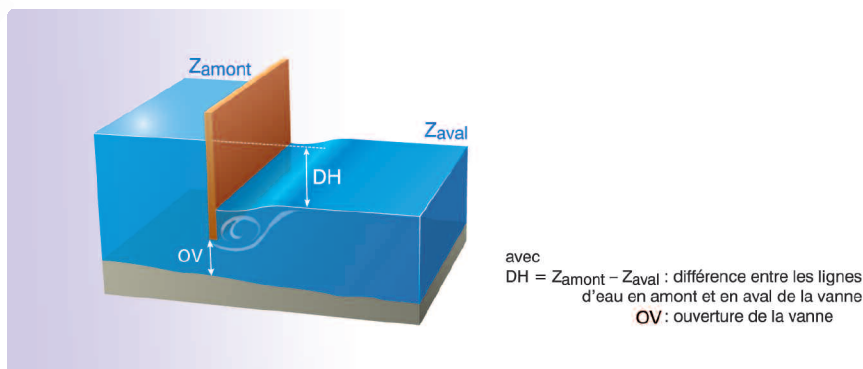
Écoulement noyé

A contrario, dans le cas d'un écoulement en régime noyé (Figure 83), le niveau d'eau en aval de la vanne est supérieur à la cote altimétrique du pied de la vanne. Dans ce cas, le niveau aval influence l'écoulement en amont et les deux hauteurs d'eau en amont et en aval (ou plus précisément la différence des niveaux d'eau de part et d'autre de la vanne) sont à prendre en compte pour apprécier les conditions d'écoulement au niveau de l'ouvrage.

La vitesse moyenne de l'écoulement au niveau de la section de passage est voisine de :

$$V_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot DH}$$

Figure 83



Écoulement sous vanne en régime noyé. Principe d'un écoulement sous vanne en régime noyé.

■ Définitions des classes de franchissabilité

En rapprochant les vitesses d'écoulement V_{\max} des capacités de nage des différentes espèces ou groupes d'espèces considérés (vitesses de sprint U_{\max} associées à la classe de taille retenue L_{\min} , L_{moy} et L_{\max}), il devient possible de déterminer la classe de franchissabilité pour des passages sous vannes ou à travers des orifices, en fonction de la hauteur de chute DH (écoulement noyé) ou de la charge sur la vanne H_{amont} (écoulement dénoyé).

Il s'agit toutefois d'une approche simplifiée car même si les paramètres (DH et H_{amont}) retenus pour appréhender la franchissabilité d'un ouvrage constituent les principaux facteurs déterminant les conditions hydrauliques sous une vanne, d'autres paramètres comme l'épaisseur de la vanne, la forme de la vanne ou la rugosité du coursier peuvent également avoir une influence.

A la condition que le tirant d'eau au niveau de la section contractée et l'ouverture sous la vanne soient suffisants, la franchissabilité est déterminée de la façon suivante :

- si le dénivelé DH (ou H_{amont} dans le cas d'une vanne dénoyée) permet d'assurer des vitesses d'écoulement V inférieures à la vitesse de sprint U_{\max} associée à la taille minimale L_{\min} des poissons de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact limité (Classe ICE = 1)** ;
- si le dénivelé DH (ou H_{amont} dans le cas d'une vanne dénoyée) permet d'assurer des vitesses d'écoulement V comprises entre les vitesses de sprint U_{\max} associées aux tailles minimale L_{\min} et moyenne L_{moy} des poissons de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact significatif (Classe ICE = 0,66)** ;
- si le dénivelé DH (ou H_{amont} dans le cas d'une vanne dénoyée) permet d'assurer des vitesses d'écoulement V comprises entre les vitesses de sprint U_{\max} associées aux tailles moyenne L_{moy} et maximale L_{\max} des poissons de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact majeur (Classe ICE = 0,33)** ;
- si le dénivelé DH (ou H_{amont} dans le cas d'une vanne dénoyée) permet d'assurer des vitesses d'écoulement V supérieures à la vitesse de sprint U_{\max} associée à la taille maximale L_{\max} des poissons de l'espèce considérée, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière totale (Classe ICE = 0)**.

Section d'ouverture

La lame d'eau et la hauteur d'ouverture minimales pour que le poisson puisse utiliser ses pleines capacités de nage et assurer son passage sous la vanne sont directement liées à la taille du poisson et à sa morphologie (facteur de forme).

Dans le cas des seuils " classiques ", le tirant d'eau minimal nécessaire (h_{\min}) pour permettre au poisson de nager avait été considéré comme voisin de 1,5 fois la hauteur moyenne des individus de l'espèce concernée (voir le passage sur le tirant d'eau minimum dans la section dédiée aux capacités de franchissement des poissons).

Cependant, il est souvent difficile de pouvoir mesurer un tirant d'eau au niveau d'une section contractée au regard des vitesses généralement importantes rencontrées à ce niveau. Aussi, pour prendre en compte le phénomène de pincement et de contraction de l'écoulement, il est proposé de retenir un tirant d'eau minimal et une **hauteur minimale d'ouverture de la vanne (OV_{\min}) correspondant à environ 2 fois les valeurs de tirant d'eau et de hauteur du poisson retenues pour les différentes espèces.**

A titre d'exemple, l'ouverture minimale nécessaire (OV_{\min}) est de l'ordre de 40 cm pour les grands salmonidés migrateurs, et de l'ordre de 10 cm pour les petites truites communes ($L < 30$ cm).

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associés à l'arbre décisionnel

Le tableau 16 synthétise les différentes valeurs seuils permettant de classer la franchissabilité d'un passage sous vanne ou par un orifice.

Ce tableau est accompagné d'un arbre décisionnel (Figure 84) permettant de définir l'état de la franchissabilité selon ICE.

■ Arbre décisionnel

Pour déterminer la classe de franchissabilité, il convient de procéder successivement aux étapes suivantes (Figure 84).

1. Comparaison du dénivelé DH (vannes noyées par l'aval) ou de la charge amont H_{amont} (vannes dénoyées par l'aval) avec $DH_{extrême}$

Si $DH \geq DH_{extrême}$ (dans le cas de vannes noyées par l'aval) ou si $H_{amont} \geq DH_{extrême}$ (dans le cas de vannes dénoyées par l'aval) (voir tableau 16), alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale au sens du protocole ICE (Classe ICE = 0).

Si $DH < DH_{extrême}$, aller en 2.

2. Analyse de l'ouverture de vanne

Si l'ouverture de la vanne ou la hauteur de l'orifice de fond $OV \geq OV_{min}$ (voir tableau 16), alors la hauteur de passage sous vanne et celle située au niveau de la section contractée sont suffisantes. Aller en 3.

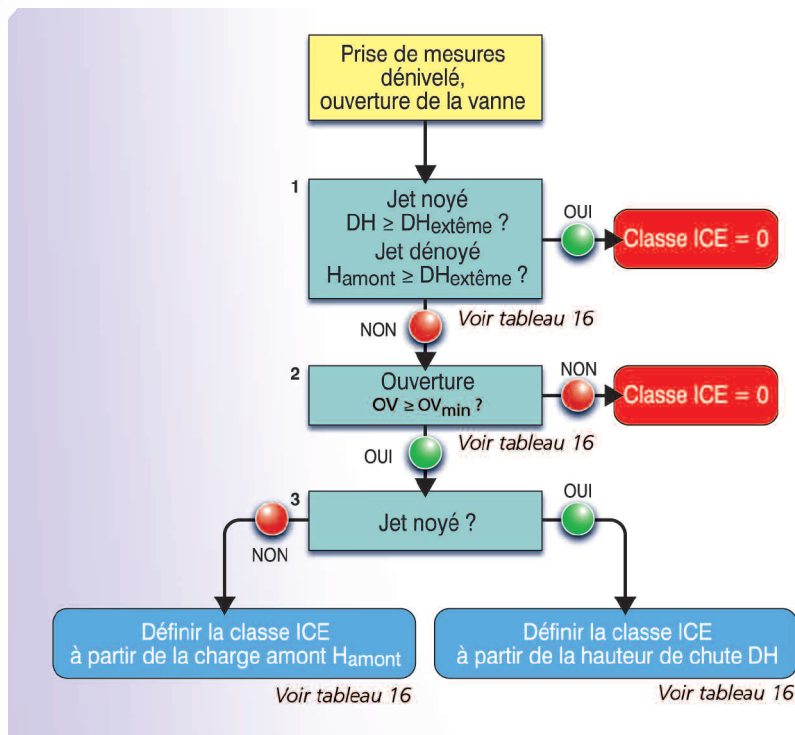
Si $OV < OV_{min}$, l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale dans cette configuration de gestion et de conditions hydrologiques (Classe ICE = 0).

3. Analyse du dénivelé DH (jets noyés) ou de la charge amont H_{amont} (jets dénoyés)

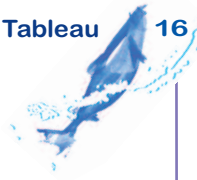
Si l'écoulement est à jet noyé, définir la classe de franchissabilité qui est fonction de la hauteur de chute DH (Tableau 16).

Si l'écoulement est à jet dénoyé, définir la classe de franchissabilité qui est fonction de la charge amont H_{amont} (Tableau 16).

Figure 84



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité d'écoulements sous organes mobiles ou par des orifices de fond.



Synthèse des critères élémentaires permettant de définir les classes de franchissabilité d'écoulements sous organes mobiles ou par des orifices de fond à l'aide de l'arbre de décision de la figure 84.

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimum nécessaire pour la nage du poisson (h _{min})	Ouverture sous vanne minimale (Ov _{min})	Valeurs seuils de dénivelé DH pour les passages sous organes mobiles en charge noyés par l'aval (ou de charge amont Hamont pour les vannes en charge dénoyées en aval) (m)				DH extrême
				Classe ICE				
				1	0,66	0,33	0	
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	0,20 m	0,40 m	≤ 1,00	[1,00 - 1,50]	[1,50 - 2,20]	>2,20	3,00 m
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0,10 m	0,20 m	≤ 0,80	[0,80 - 1,10]	[1,10 - 1,50]	>1,50	2,50 m
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0,15 m	0,30 m	≤ 0,60	[0,60 - 0,90]	[0,90 - 1,30]	>1,30	2,00 m
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	0,10 m	0,20 m					
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)							
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,10 m	0,20 m	≤ 0,45	[0,45 - 0,80]	[0,80 - 1,30]	>1,30	2,00 m
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0,05 m	0,10 m	≤ 0,30	[0,30 - 0,50]	[0,50 - 0,60]	>0,60	1,50 m
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	0,15 m	0,30 m	≤ 0,60	[0,60 - 0,90]	[0,90 - 1,30]	>1,30	2,00 m
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,10 m	0,20 m	≤ 0,45	[0,45 - 0,70]	[0,70 - 1,00]	>1,00	1,50 m
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>) Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	0,10 m	0,20 m	≤ 0,30	[0,30 - 0,50]	[0,50 - 0,80]	>0,80	1,50 m
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	0,05 m	0,10 m					
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	0,25 m	0,50 m	≤ 0,20	[0,20 - 0,40]	[0,40 - 0,60]	> 0,60	1,50 m
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>) Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)	0,15 m	0,30 m					
8c	Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>) Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>) Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>) Perche (<i>Perca fluviatilis</i>) Tanche (<i>Tinca tinca</i>)	0,10 m	0,20 m					
8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors Idus</i>)	0,05 m	0,10 m					
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette sprirlin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	0,05 m	0,10 m	≤ 0,10	[0,10 - 0,25]	[0,25 - 0,45]	> 0,45	1,00 m
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>) Chabots (<i>Cottus sp</i>) Goujons (<i>Gobio sp</i>) Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>) Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>) Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>) Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)							
10	Able de Heckel (<i>Leucaspis delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	0,05 m	0,10 m	≤ 0,05	[0,05 - 0,10]	[0,10 - 0,20]	> 0,20	1,00 m
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,02 m	0,04 m	≤ 0,10	[0,10 - 0,25]	[0,25 - 0,45]	> 0,45	1,00 m
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-	-	-

(*) Les valeurs fournies pour l'anguille correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage de l'espèce. Dans le cas où l'obstacle présente une zone de reptation en complément, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à la reptation (voir section dédiée au cas particulier de l'anguille).



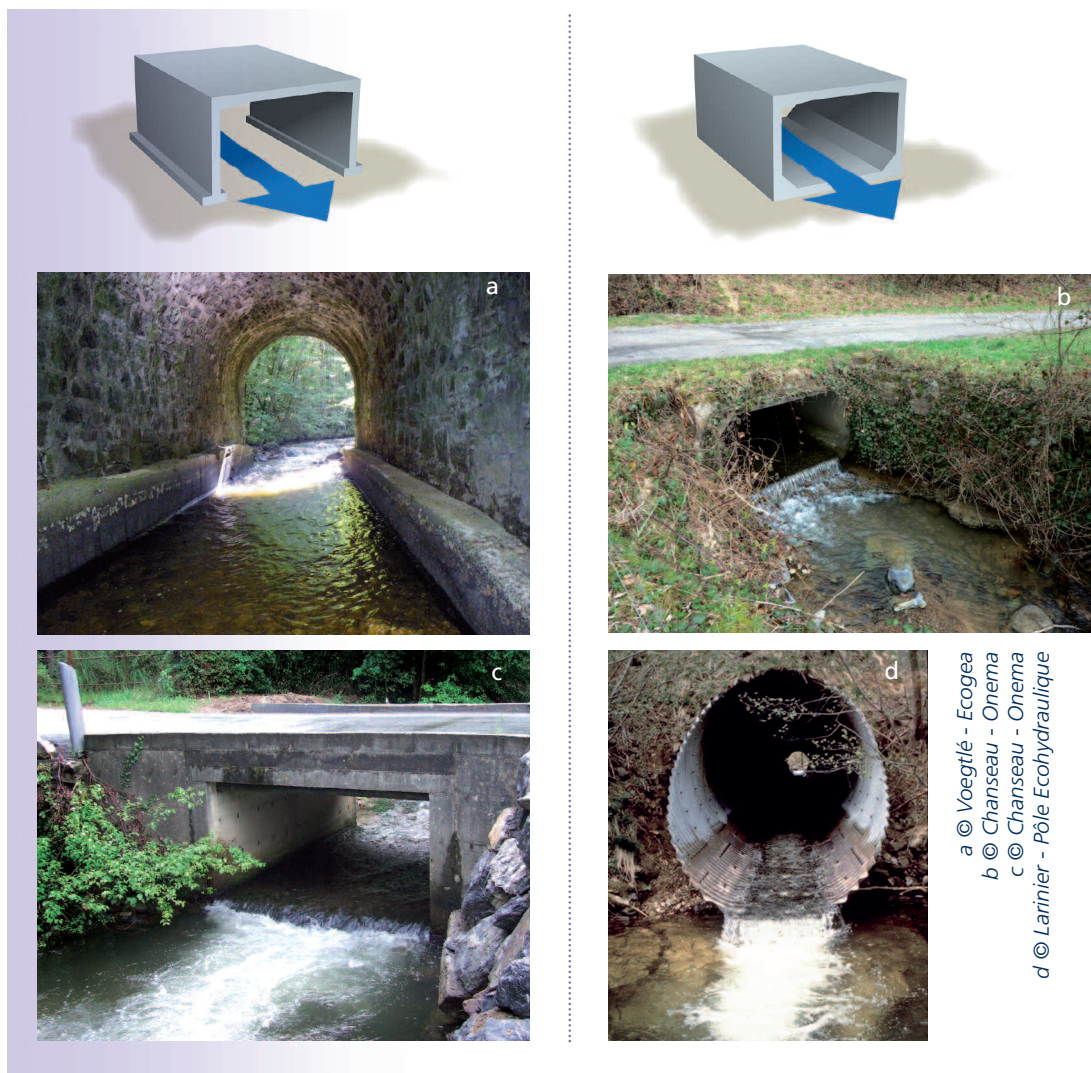
Cas des ouvrages routiers ou ferroviaires

Les différents types d'ouvrages

Cette partie traite de l'évaluation de la franchissabilité des ouvrages routiers, autoroutiers et ferroviaires (Figure 85 abcd) : les ponts cadres de type PIPO (passage inférieur en portique ouvert) ou PICF (passage inférieur en cadre fermé), les passages busés ou les arches et certains ouvrages qui peuvent s'en approcher (radiers de pont, gués...).

En se substituant localement au milieu naturel, ces ouvrages modifient généralement le substrat (cas notamment des PICF), les conditions d'éclaircement et le régime d'écoulement des eaux.

Figure 85



a © Voegtli - Ecogea
b © Chanseau - Onema
c © Chanseau - Onema
d © Larimer - Pôle Ecohydraulique

Schémas et photos de passages inférieurs en portique ouvert (PIPO) ou en cadre fermé (PICF). (a, c) Passage Inférieur en Portique Ouvert, (b, d) Passage Inférieur en Cadre Fermé.

Les principales causes pouvant limiter le franchissement

Les ouvrages de franchissement routiers peuvent constituer des obstacles sérieux à la migration des poissons vers l'amont.

Les principaux facteurs susceptibles de limiter le franchissement piscicole sont décrits ci-dessous.

■ Des vitesses d'écoulement trop fortes à l'intérieur de l'ouvrage

Dès que la pente de l'ouvrage (buse, ponceau...) devient significative, l'écoulement subit une accélération brutale en tête de l'ouvrage. Compte tenu de sa faible rugosité, les vitesses atteignent rapidement des valeurs importantes (l'écoulement pouvant même devenir torrentiel) (Figure 86ab).

L'uniformité des vitesses exclut par ailleurs toute zone de repos pour le poisson, qui doit franchir l'ouvrage d'un seul trait. L'effort demandé peut alors largement excéder ses capacités de nage, en particulier son endurance.

Figure 86



Exemples de fortes vitesses au niveau de passages busés.

a © Voegtlié - Ecogea
b © Baudoin - Onema

■ Des tirants d'eau trop faibles

La faible rugosité du fond et la pente souvent forte des ouvrages peuvent se traduire par des profondeurs d'eau très faibles, notamment en période de basses eaux, ce qui peut rendre la nage et la progression du poisson difficiles voire impossibles (Figure 87ab).

Plus rarement, il arrive que la largeur de l'ouvrage soit surdimensionnée par rapport à la largeur du cours d'eau sur le secteur. Lorsque le profil transversal du radier est horizontal, sans lit mineur ou chenal particulier, le tirant d'eau peut alors devenir très faible, même hors période d'étiage.

Figure 87



Exemples de faibles tirants d'eau au niveau de deux radiers sous ponts routiers.

a © Voegtlié - Ecogea
b © Onema

■ La présence d'une chute à l'intérieur (redan) ou en aval de l'ouvrage

Le blocage du poisson peut également se produire à l'extrémité aval de l'ouvrage en raison de la présence d'une chute (Figure 88abcd). Ce phénomène très fréquent résulte le plus souvent d'un mauvais calage de l'ouvrage par rapport au profil du cours d'eau. Cela peut aussi provenir de l'abaissement en aval du lit du cours d'eau lorsque aucune mesure préventive (seuil de contrôle) n'a été prise pour stabiliser le lit.

L'angle d'incidence du jet en sortie de buse résulte de la mise en vitesse des écoulements à l'intérieur de l'ouvrage et peut accentuer ce problème de franchissement de chute aval.

Plus rarement, il peut exister un redan au sein de l'ouvrage. Ce phénomène est souvent engendré par un mauvais calage entre les différents éléments constitutifs. Les faibles tirants d'eau généralement observés rendent alors le franchissement particulièrement difficile, même si le redan présente une hauteur limitée.

Figure 88



Exemples de chutes en aval d'ouvrages routiers.

a © Burgun - Onema
b, d © Chanseau - Onema
c © Voegtli - Ecogea

■ Un mauvais calage en tête

Plus rarement, un mauvais calage de la partie amont de l'ouvrage peut se traduire par l'existence, en amont immédiat, dans le lit du cours d'eau, d'une zone à forte vitesse et à faible tirant d'eau difficilement franchissable par le poisson (Figures 89a et 89b).

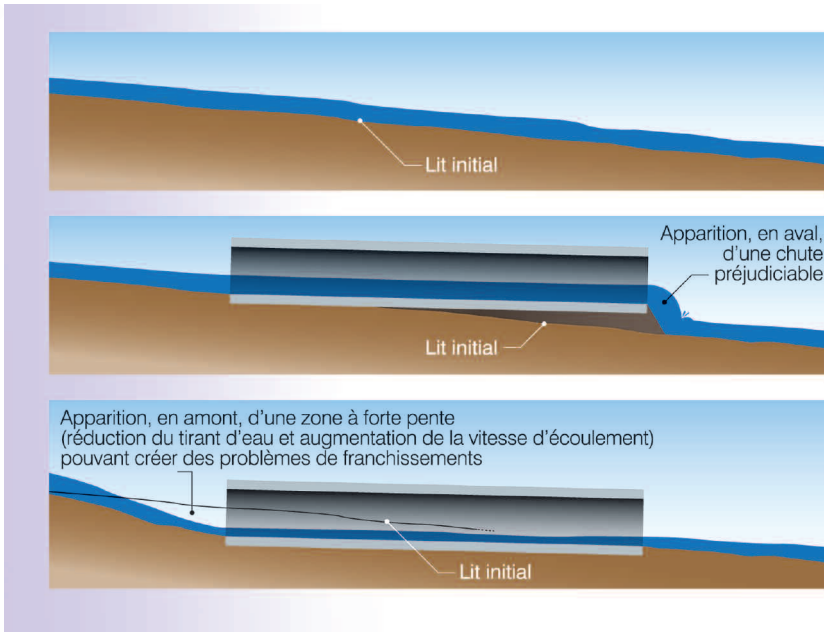
Figure 89a



© Voegtli - Ecogea

Exemples de mises en vitesse en amont de passages busés.

Figure 89 b



Exemples de problèmes pouvant survenir suite à un mauvais calage longitudinal de l'ouvrage.

- **L'accumulation de débris à l'entrée ou dans les ouvrages** représente aussi une cause de blocage pour les migrateurs. C'est notamment le cas lorsque les ouvrages sont sous-dimensionnés par rapport à la largeur du cours d'eau (fort rétrécissement de la section de passage) et lorsque le tirant d'air entre la ligne d'eau et la tête de l'ouvrage hydraulique est insuffisant (Figure 90ac).

Figure 90



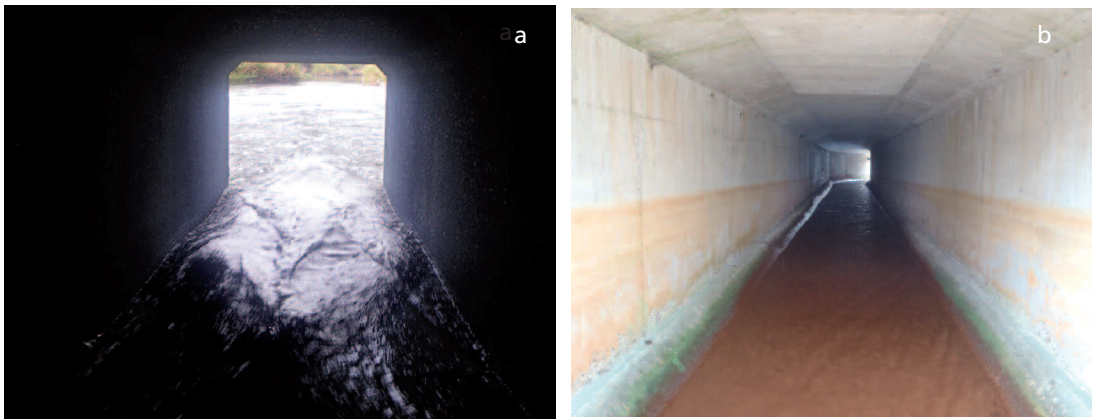
a, b © Voegtje - Ecogea
c © Burgun - Onema

■ **Le changement brusque d'intensité lumineuse.** Lorsqu'il existe un changement brusque d'intensité lumineuse entre le milieu extérieur et l'entrée de la buse (Figure 91ab), certaines espèces (plus particulièrement celles se déplaçant en journée) peuvent éprouver des réticences à s'engager ou à progresser dans l'ouvrage.

Les connaissances étant toutefois parcellaires, ce type de perturbation ne sera pas pris en compte dans le protocole ICE.

Pour plus de détails, le lecteur pourra notamment se référer aux rapports établis par le Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables en 2007 et 2008 (Egis Environnement-Hydrosphère, 2007 et 2008).

Figure 91



(a) Changement de luminosité assez brusque pouvant impacter le franchissement diurne de l'ouvrage, (b) ouvrage de section plus importante et entraînant un changement de luminosité plus progressif.

a © Voegtli - Ecogea
b © Chanseau - Onema

Principe de l'évaluation

L'expertise de la franchissabilité de l'ouvrage consiste à relever puis à évaluer l'impact des principaux facteurs susceptibles de limiter les déplacements des différentes espèces ou groupes d'espèces.

Les facteurs les plus importants sont le couple vitesse/distance à franchir, le tirant d'eau et les chutes ou redans dans ou en pied d'ouvrage.

Evaluation de la distance franchissable par un poisson dans un écoulement de vitesse donnée

Ces ouvrages, contrairement aux seuils, sont généralement caractérisés par des pentes modérées (au maximum de quelques pourcents) mais présentent des longueurs qui peuvent s'avérer importantes.

La distance maximale franchissable pour une espèce donnée dépend de la vitesse d'écoulement dans l'ouvrage, qui est elle-même fortement liée à la forme de l'ouvrage, sa rugosité, sa pente et son débit d'alimentation.

L'analyse de la franchissabilité peut s'effectuer d'une manière analogue à celle utilisée pour les seuils à parement aval inclinés. L'analyse portera ainsi sur la distance maximale franchissable par un poisson caractérisé par sa vitesse de nage (U) et son endurance correspondante (t_U) dans un écoulement de vitesse moyenne V .

Pour les ouvrages à pente relativement forte (plusieurs pourcents), les poissons, en particulier les petites espèces, devront faire appel à leur vitesse de sprint (U_{max}).

Pour les ouvrages présentant des pentes plus faibles, le poisson peut ne pas avoir à utiliser sa vitesse maximale de nage pour franchir l'obstacle. Il utilisera, à condition que la vitesse de l'écoulement dans l'ouvrage soit assez éloignée de sa vitesse de sprint, une vitesse de nage qui se situe dans le domaine des vitesses soutenues. C'est alors la longueur de l'ouvrage qui peut devenir le paramètre limitant.

■ Rythme natatoire utilisé par le poisson (de la vitesse de croisière au sprint)

La puissance musculaire maximale d'un poisson correspondant à la glycolyse anaérobie (P_{ana}) est proportionnelle à sa vitesse maximale U_{max} :

$$P_{ana} = k U_{max}^3$$

La puissance musculaire maximale correspondant à la glycolyse aérobie (P_{aer}) est proportionnelle à la vitesse limite (supérieure) de croisière U_{Cr} avant le passage en anaérobie :

$$P_{aer} = k U_{Cr}^3$$

D'après Bell (1981), l'énergie (puissance x temps) musculaire anaérobie (W_{ana}) disponible lors de la nage à vitesse maximale est donc :

$$W_{ana} = P_{ana} \cdot t_{Umax} = k \cdot U_{max}^3 \cdot t_{Umax}$$

Dans un régime de nage à la vitesse U en régime semi aérobie-anaérobie, c'est-à-dire lorsque U est comprise entre U_{\max} et U_{cr} , la puissance musculaire dépensée est la suivante :

$$P = k U^3$$

La puissance anaérobie dépensée peut donc s'écrire :

$$P_{ana} = P - P_{aer} = k (U^3 - U_{cr}^3)$$

L'énergie musculaire anaérobie maximale disponible lors de la nage à vitesse U peut donc s'écrire :

$$W_{ana} = t_U k (U^3 - U_{cr}^3).$$

On a donc

$$W_{ana} = t_U k (U^3 - U_{cr}^3) = k \cdot U_{\max}^3 \cdot t_{U_{\max}}$$

Soit

$$t_U = U_{\max}^3 \cdot t_{U_{\max}} / (U^3 - U_{cr}^3)$$

La distance D maximale parcourue par le poisson nageant à la vitesse U dans un écoulement de vitesse V est donc :

$$D = (t_{U_{\max}} U_{\max}^3)(U-V)/(U^3 - U_{cr}^3)$$

D'après Videler (1993), la vitesse de croisière d'un poisson est globalement égale au tiers de sa vitesse maximale de nage ($U_{\max} \approx 3 U_{cr}$). Aussi, la distance D maximale parcourue par un poisson nageant à une vitesse U peut s'écrire également :

$$D = 27 t_{U_{\max}} U_{cr} (U/U_{cr} - V/U_{cr}) / ((U/U_{cr})^3 - 1)$$

La distance maximale est parcourue pour $\delta D / \delta U = 0$, c'est-à-dire lorsque :

$$U/U_{cr} = 1 + 1,913 (V/U_{cr} - 1)^{0,72}$$

Pour une vitesse d'écoulement donnée, cette expression donne la vitesse de nage maximisant la distance parcourue.

Un premier maximum existe lorsque $V < U_{cr}$ et $U = U_{cr}$, la distance D étant évidemment infinie.

Si $V > 2/3 U_{\max}$, l'optimum de la vitesse de nage devient alors très proche de U_{\max} puisque $U > 0,95 U_{\max}$.

Un poisson a donc intérêt à nager à sa vitesse de croisière U_{cr} tant que la vitesse d'écoulement n'excède pas la limite supérieure de celle-ci.

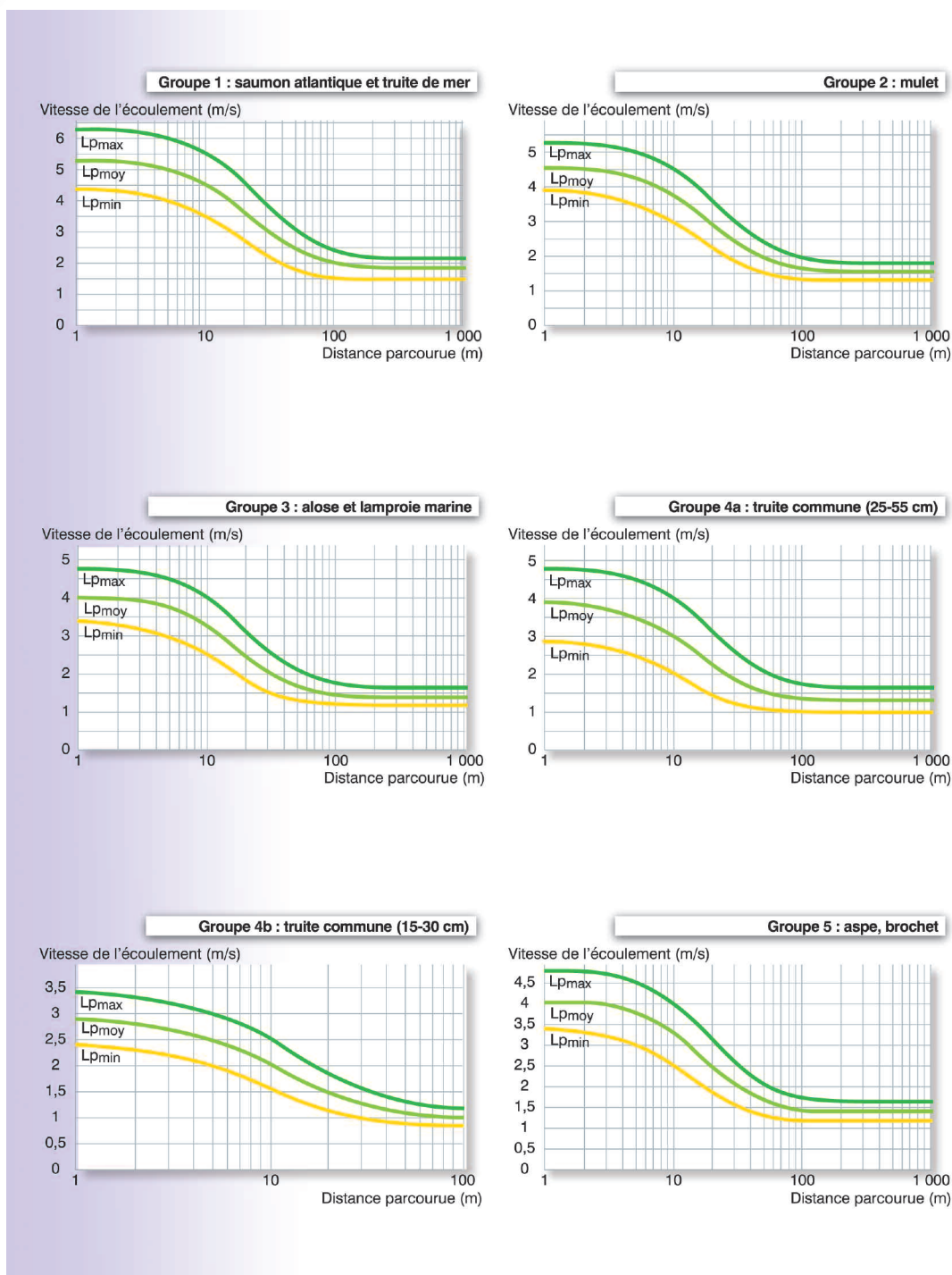
Lorsque la vitesse de l'écoulement devient supérieure à 2/3 de la vitesse maximale de nage, la distance franchie est maximale lorsque le poisson adopte sa vitesse maximale de nage.

■ Evaluation de la distance franchissable maximale par un poisson dans un écoulement de vitesse donnée

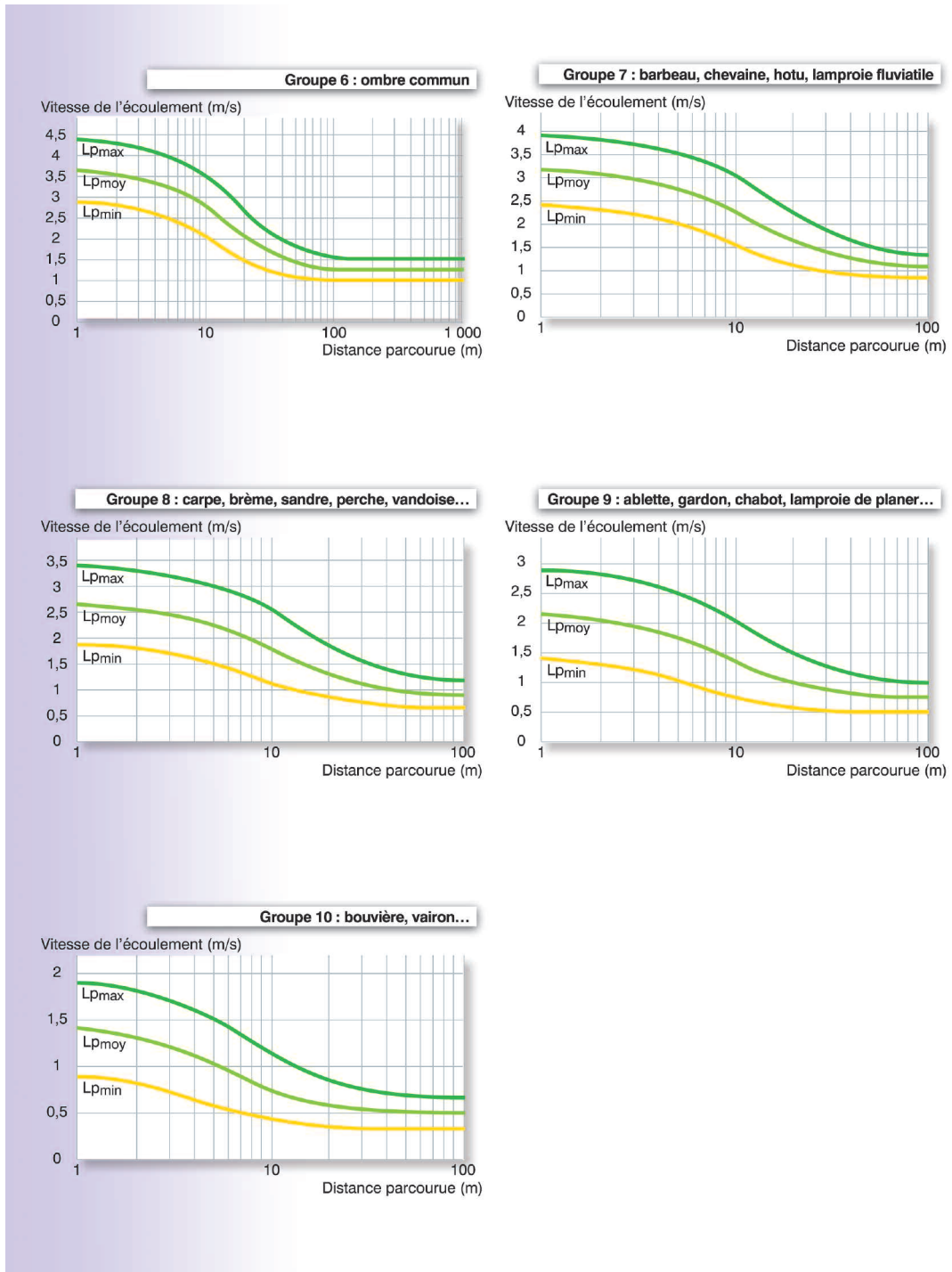
Pour les différents groupes d'espèces, l'évolution des distances parcourues en fonction de la vitesse de l'écoulement a été reportée en coordonnées semi-logarithmiques, en faisant l'hypothèse que le poisson optimisait sa vitesse de nage en fonction de la vitesse de l'écoulement (Figures 92 et 93).

Pour chaque espèce ou groupe d'espèce, les courbes verte foncée, verte claire et jaune correspondent respectivement aux individus de taille maximale (L_{pmax}), moyenne (L_{pmoy}) et minimale (L_{pmin}).

Figure 92



Evolution de la distance parcourue en fonction de la vitesse de l'écoulement pour les espèces ou groupes d'espèces n°1 à 5.



Evolution de la distance parcourue en fonction de la vitesse de l'écoulement pour les espèces ou groupes d'espèces n°6 à 10.

Définition des classes de franchissabilité

Pour des seuils à parement aval incliné (voir section spécifique aux seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150\%$), il a été possible, pour chaque espèce ou groupe d'espèce, de définir des classes de franchissabilité (0, 0,33, 0,66 et 1) en fonction de la hauteur de chute DH.

Pour les ouvrages routiers, les analyses hydrauliques montrent qu'à partir d'une certaine valeur de pente et d'une certaine longueur à franchir (valeurs fonction de l'espèce et du groupe d'espèce), tous les ouvrages constituent un obstacle plus ou moins sélectif. Par contre, en deçà des valeurs limitantes de pente et de longueur, il est impossible de déterminer la franchissabilité de l'ouvrage (Classe ICE=NC). Il convient alors de procéder à une analyse des vitesses dans l'ouvrage, soit par une modélisation hydraulique à l'aide d'un logiciel spécifique (FishXing, Hec Ras ou similaires), soit plus simplement par des mesures des vitesses d'écoulement dans l'ouvrage. Ces mesures ne sont cependant pas toujours évidentes à effectuer, en particulier lorsque les dimensions de l'ouvrage ne permettent pas de pénétrer à l'intérieur.

Les courbes fournies sur les figures 92 et 93 constituent les limites entre les classes de franchissabilité (0, 0,33, 0,66 et 1). Pour déterminer, pour une espèce ou un groupe d'espèces, les pentes limites franchissables pour une longueur d'ouvrage donnée, les vitesses d'écoulement limites (V_{max}) permettant le franchissement de l'ouvrage ont été extraites des abaques présentés précédemment.

Les pentes donnant la valeur de cette vitesse d'écoulement pour des rugosités courantes d'ouvrages (Manning $n=0,01$ à $0,03$) et pour des débits unitaires variant de $0,05$ à $2 \text{ m}^2/\text{s}$ ont ensuite été calculées.

Une analyse statistique sur les pentes a ensuite été effectuée, en vérifiant que le tirant d'eau est supérieur à la profondeur d'eau minimale pour l'espèce considérée.

L'analyse a été effectuée pour des ouvrages de longueurs $L < 20\text{m}$, $20 < L < 50\text{m}$ et $50\text{m} < L < 100\text{m}$.

Présence d'une chute aval

De manière très fréquente, les passages busés ou ouvrages routiers, présentent une chute à leur extrémité aval (Figure 94), pouvant bloquer de manière notable le franchissement des poissons.

La chute aval sera analysée sur le plan de sa franchissabilité piscicole suivant la même méthodologie que celle utilisée pour les seuils à parements verticaux. Une première classe de franchissabilité de la chute sera donc établie à partir de l'arbre décisionnel et du tableau associé fournis dans la section dédiée aux obstacles verticaux ou quasi-verticaux (pente $> 150 \%$).

Afin de prendre en compte cet impact qui peut être significatif dans certains cas, la même méthodologie que pour les ouvrages complexes ou mixtes (voir section spécifique dédiée à ce type d'ouvrages) ou que pour les seuils inclinés présentant une chute aval (voir section sur les seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150 \%$) a été adoptée. Cela consiste à dégrader globalement la classe ICE retenue pour l'ensemble de l'ouvrage ou tout au moins à retenir la classe ICE de la partie la plus problématique (chute aval ou buse).

Figure 94

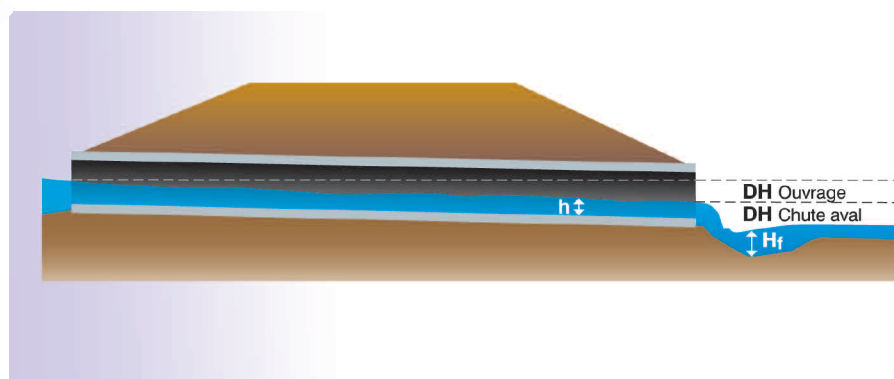


Schéma de principe d'un ouvrage routier présentant une chute aval.

Le tableau 17 présente la classe de franchissabilité retenue pour l'ensemble de l'ouvrage en fonction des classes de chacune des deux parties (passage routier et chute aval).

Tableau 17

Matrice permettant de calculer la classe ICE finale d'un ouvrage routier présentant une chute aval.

Classe ICE de l'ouvrage busé	Classe ICE de la chute aval			
	0	0,33	0,66	1
0	0	0	0	0
0,33	0	0	0,33	0,33
0,66	0	0,33	0,33	0,66
1	0	0,33	0,66	1
NC	0	NC ($\leq 0,33$)	NC ($\leq 0,66$)	NC

Présence d'un redan dans l'ouvrage

Comme pour les seuils, la présence d'un redan dans l'ouvrage peut singulièrement dégrader les conditions de franchissement, en particulier en condition de bas débit. Le degré de blocage est fonction du type d'écoulement induit par le ou les redans. Le cas le plus courant est le décrochement entre deux éléments (buses ou dalots) formant l'ouvrage (Figure 95).

Figure 95



© Baudoin - Onema

Exemple de buse mal calée avec des décrochements entre les éléments constitutifs.

Le poisson ne peut franchir un redan que par la nage, donc lorsque le redan est effacé et que l'écoulement est en écoulement de surface (skimming flow).

Les mêmes critères que ceux des seuils classiques seront adoptés. Ils portent notamment sur les dimensions relatives du redan par rapport à la taille moyenne ($L_{p_{MOY}}$) de l'espèce ou du groupe d'espèces cible (voir partie sur les redans dans le cas de seuils à parement aval incliné de pente ≤ 150 %).

Cas d'ouvrages en charge et/ou noyés par l'aval

Suivant la dimension des ouvrages en rapport avec le débit du cours d'eau, l'entrée de l'ouvrage peut se retrouver en charge, c'est-à-dire complètement noyé sous le niveau d'eau amont. Dans ce cas, l'ouvrage fonctionne comme un orifice de fond ou un ajutage et les vitesses au niveau de l'entrée amont sont beaucoup plus importantes que si l'écoulement était à surface libre.

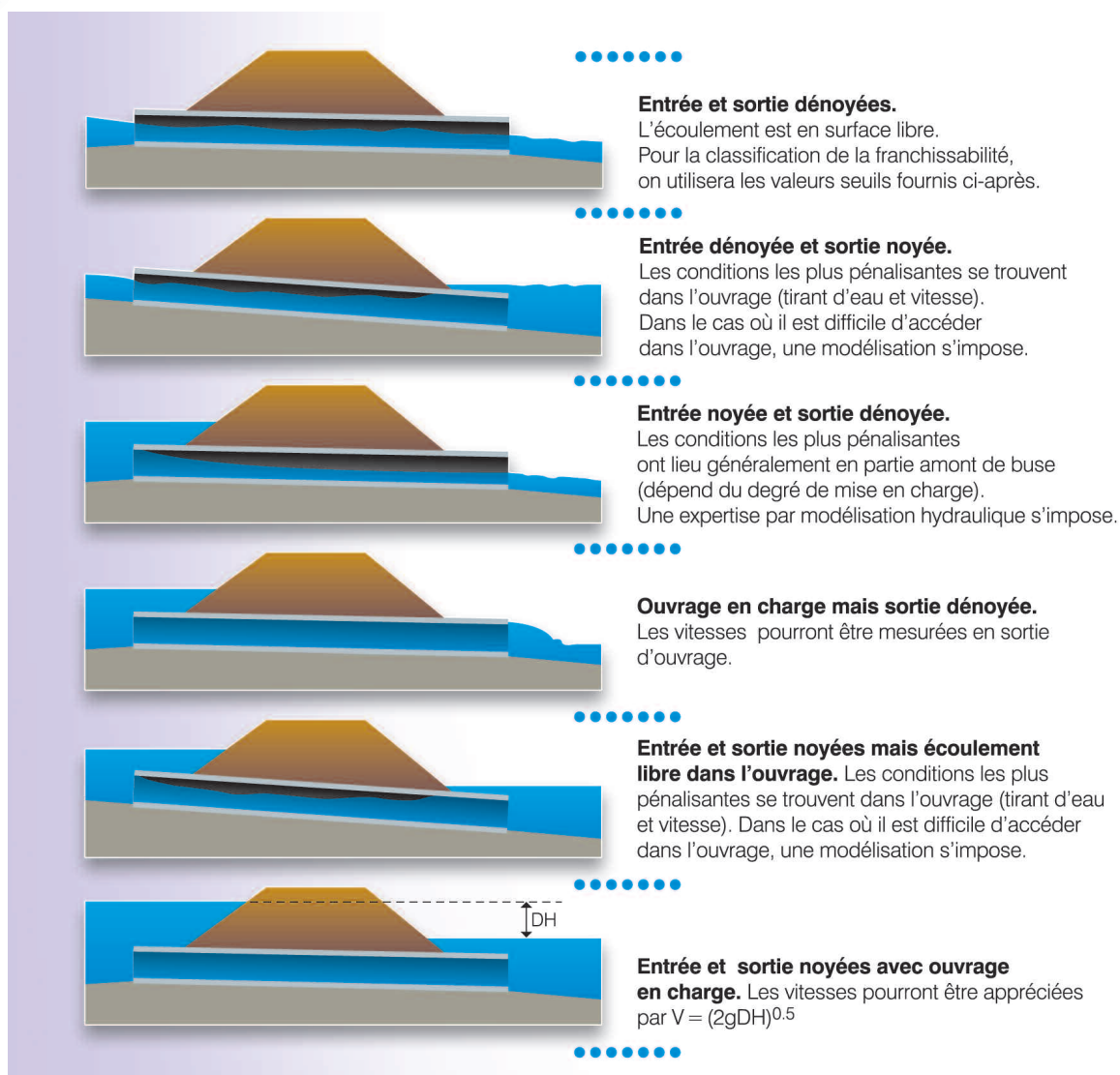
Lorsque l'ouvrage est noyé en amont, cela signifie généralement que les passages hydrauliques sont de dimensions réduites (buse ou petit dalot) et ne permettent pas des mesures de vitesse et de tirants d'eau. L'appréciation de la franchissabilité de l'ouvrage devra alors passer soit par une appréciation de la vitesse maximale par une loi d'orifice (voir section spécifique sur les écoulements sous vannes), soit plus généralement par une modélisation hydraulique à l'aide d'un logiciel dédié (FishXing, Hec Ras...).

Dans d'autres cas, l'ouvrage peut être noyé partiellement par l'aval. Une prise de mesures de vitesses et de tirants d'eau en sortie hydraulique d'ouvrage n'est alors pas représentative des vitesses d'écoulement dans l'ouvrage. Dans le cas où il s'avérerait impossible d'entrer dans l'ouvrage pour effectuer des mesures de vitesses, seule une modélisation hydraulique permettra d'apprécier les conditions hydrauliques rencontrées par le poisson sur tout le linéaire à franchir.

Toutefois, dans le cas où une modélisation hydraulique s'impose théoriquement, il est souvent judicieux d'effectuer tout de même l'analyse à partir de l'arbre décisionnel et des tableaux associés fournis (Tableaux 18 et 19). La classe de franchissabilité obtenue sera alors considérée comme une classe "maximale" (Classe ICE de l'ouvrage \leq Classe obtenue). Suivant la classe de franchissabilité obtenue en réalisant l'analyse, il est alors possible de déterminer d'ores et déjà l'utilité d'avoir recours à une modélisation hydraulique.

La figure 96 représente diverses configurations possibles d'écoulements au travers de passages busés et les méthodes permettant d'en déterminer la franchissabilité.

Figure 96



Diverses configurations d'écoulement dans les buses.

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associés à l'arbre décisionnel

Le tableau 18 permet de déterminer la franchissabilité d'un ouvrage en fonction de sa longueur et de sa pente.

Tableau 18

Synthèse des critères élémentaires permettant de calculer la classe ICE d'ouvrages routiers ou passages busés, en fonction de la pente et de la longueur de l'ouvrage, et à l'aide de l'arbre de décision de la figure 97.

Groupe ICE	Espèces	Trant d'eau minimum nécessaire pour la nage (h _{min})	Dimensions maximales des redans		Valeurs seuils de pente d'ouvrage pour le diagnostic des passages routiers (%)							
					Louvrage ≤ 20m				Louvrage > 20m			
					Classe ICE				Classe ICE			
					NC	0,66	0,33	0	NC	0,33	0	0
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	0,20 m	0,35 m	0,50 m	≤4,00	]4,00 - 7,00]	]7,00 - 12,00]	>12,00	≤4,00	]4,00 - 7,00]	>7,00
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0,10 m	0,20 m	0,30 m	≤3,50	]3,50 - 6,00]	]6,00 - 10,00]	>10,00	≤3,50	]3,50 - 6,00]	>6,00
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0,15 m	0,25 m	0,40 m	≤3,00	]3,00 - 5,00]	]5,00 - 8,00]	>8,00	≤3,00	]3,00 - 5,00]	>5,00
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	0,10 m	0,20 m	0,30 m								
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)	0,10 m	0,35 m	0,50 m								
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,10 m	0,20 m	0,30 m	≤3,00	]3,00 - 5,00]	]5,00 - 8,00]	>8,00	≤3,00	]3,00 - 5,00]	>5,00
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0,05 m	0,10 m	0,15 m	≤1,00	]1,00 - 2,00]	]2,00 - 4,00]	>4,00	≤1,00	]1,00 - 2,00]	>2,00
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	0,15 m	0,30 m	0,40 m	≤3,00	]3,00 - 5,00]	]5,00 - 8,00]	>8,00	≤3,00	]3,00 - 5,00]	>5,00
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,10 m	0,15 m	0,25 m	≤2,00	]2,00 - 3,00]	]3,00 - 6,00]	>6,00	≤2,00	]2,00 - 3,00]	>3,00
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>) Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	0,10 m	0,15 m	0,20 m	≤1,00	]1,00 - 2,00]	]2,00 - 4,00]	>4,00	≤1,00	]1,00 - 2,00]	>2,00
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	0,05 m	0,15 m	0,25 m								
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	0,25 m	0,25 m	0,40 m								
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>) Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)	0,15 m	0,20 m	0,25 m	≤0,75	]0,75 - 1,25]	]1,25 - 2,00]	>2,00	≤0,75	]0,75 - 1,50]	>1,50
8c	Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>) Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>) Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>) Perche (<i>Perca fluviatilis</i>) Tanche (<i>Tinca tinca</i>)	0,10 m	0,15 m	0,20 m								
	8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors idus</i>)	0,05 m	0,10 m								0,15 m
	9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette sprinlin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	0,05 m	0,05 m								0,10 m
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>) Chabots (<i>Cottus sp</i>) Goujons (<i>Gobio sp</i>) Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>) Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>) Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>) Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)											
10	Able de Heckel (<i>Leucaspius delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymmnurus</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	0,05 m	0,05 m	0,05 m	≤0,50	]0,50 - 1,00]	]1,00 - 1,50]	>1,50	≤0,50	]0,50 - 1,00]	>1,00
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,02 m	0,10 m	0,15 m	≤0,75	]0,75 - 1,25]	]1,25 - 2,00]	>2,00	≤0,75	]0,50 - 1,50]	>1,50
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

(* Les valeurs fournies pour l'anguille correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage de l'espèce. Dans le cas où l'obstacle présente une zone de reptation en complément, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à la reptation (voir section dédiée au cas particulier de l'anguille).

Dans certains cas, lorsque la pente est trop faible, il convient d'apprécier les vitesses d'écoulement. Le tableau 19 permet alors de déterminer la franchissabilité. Les tableaux reprennent également les tirants d'eau minimums nécessaires (h_{\min}) et les dimensions maximales (a_{\max} et c_{\max}) relatives à l'analyse des redans. Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 97) permettant de définir les classes de franchissabilité.

Tableau 19

Synthèse des critères élémentaires permettant de calculer la classe ICE d'ouvrages routiers ou passages busés, en fonction de la longueur et des vitesses de l'écoulement au sein de l'ouvrage, et à l'aide de l'arbre de décision de la figure 97.

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimum nécessaire pour la nage (h_{\min})	Dimensions maximales des redans		Valeurs seuils de vitesses dans l'ouvrage pour le diagnostic des passages routiers (m/s)															
					Louvrage ≤ 20m				20m < Louvrage ≤ 50m				Louvrage > 50m							
					Classe ICE				Classe ICE				Classe ICE							
					1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0				
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	0,20 m	0,35 m	0,50 m	≤ 2,70	]2,70 - 3,60]	]3,60 - 4,50]	>4,50	≤ 1,80	]1,80 - 2,40]	]2,40 - 3,00]	>3,00	≤ 1,50	]1,50 - 2,00]	]2,00 - 2,40]	>2,40
	Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)				≤ 2,70	]2,70 - 3,60]	]3,60 - 4,50]	>4,50	≤ 1,80	]1,80 - 2,40]	]2,40 - 3,00]	>3,00	≤ 1,50	]1,50 - 2,00]	]2,00 - 2,40]	>2,40
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0,10 m	0,20 m	0,30 m	≤ 2,25	]2,25 - 2,90]	]2,90 - 3,60]	>3,60	≤ 1,60	]1,60 - 2,00]	]2,00 - 2,40]	>2,40	≤ 1,35	]1,35 - 2,00]	]2,00 - 2,40]	>2,40
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0,15 m	0,25 m	0,40 m	≤ 1,85	]1,85 - 2,50]	]2,50 - 3,10]	>3,10	≤ 1,35	]1,35 - 1,70]	]1,70 - 2,15]	>2,15	≤ 1,20	]1,20 - 1,45]	]1,45 - 1,75]	>1,75
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)	0,20 m	0,30 m	0,40 m																
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)	0,10 m	0,35 m	0,50 m	≤ 1,85	]1,85 - 2,50]	]2,50 - 3,10]	>3,10	≤ 1,35	]1,35 - 1,70]	]1,70 - 2,15]	>2,15	≤ 1,20	]1,20 - 1,45]	]1,45 - 1,75]	>1,75
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,10 m	0,20 m	0,30 m	≤ 1,85	]1,85 - 2,50]	]2,50 - 3,10]	>3,10	≤ 1,35	]1,35 - 1,70]	]1,70 - 2,15]	>2,15	≤ 1,20	]1,20 - 1,45]	]1,45 - 1,75]	>1,75
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0,05 m	0,10 m	0,15 m	≤ 1,15	]1,15 - 1,70]	]1,70 - 2,25]	>2,25	≤ 0,80	]0,80 - 1,20]	]1,20 - 1,60]	>1,60	≤ 0,80	]0,80 - 1,15]	]1,15 - 1,40]	>1,40
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	0,15 m	0,30 m	0,40 m	≤ 1,85	]1,85 - 2,50]	]2,50 - 3,10]	>3,10	≤ 1,35	]1,35 - 1,70]	]1,70 - 2,15]	>2,15	≤ 1,20	]1,20 - 1,45]	]1,45 - 1,75]	>1,75
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,10 m	0,15 m	0,25 m	≤ 1,50	]1,50 - 2,05]	]2,05 - 2,75]	>2,75	≤ 1,10	]1,10 - 1,45]	]1,45 - 1,80]	>1,80	≤ 1,10	]1,10 - 1,30]	]1,30 - 1,55]	>1,55
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)	0,10 m	0,15 m	0,20 m	≤ 1,20	]1,20 - 1,70]	]1,70 - 2,25]	>2,25	≤ 0,80	]0,80 - 1,20]	]1,20 - 1,60]	>1,60	≤ 0,80	]0,80 - 1,15]	]1,15 - 1,40]	>1,40
	Chevaline (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)																			
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	0,05 m	0,15 m	0,25 m																
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	0,25 m	0,25 m	0,40 m																
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>)	0,15 m	0,20 m	0,25 m																
	Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)																			
8c	Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>)	0,10 m	0,15 m	0,20 m	≤ 0,85	]0,85 - 1,15]	]1,15 - 1,60]	>1,60	≤ 0,70	]0,70 - 1,00]	]1,00 - 1,35]	>1,35	≤ 0,70	]0,70 - 0,95]	]0,95 - 1,20]	>1,20
	Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>)																			
	Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>)																			
	Perche (<i>Perca fluviatilis</i>) Tanche (<i>Tinca tinca</i>)																			
8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors idus</i>)	0,05 m	0,10 m	0,15 m																
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>)	0,05 m	0,05 m	0,10 m	≤ 0,85	]0,85 - 1,15]	]1,15 - 1,60]	>1,60	≤ 0,70	]0,70 - 1,00]	]1,00 - 1,35]	>1,35	≤ 0,70	]0,70 - 0,95]	]0,95 - 1,20]	>1,20
	Ablette spirilin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>)																			
	Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>)																			
	Blageon (<i>Telestes souffia</i>)																			
	Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>)																			
	Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>)																			
	Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>)																			
Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)																				
Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)																				
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>)	0,05 m	0,05 m	0,10 m	≤ 0,85	]0,85 - 1,15]	]1,15 - 1,60]	>1,60	≤ 0,70	]0,70 - 1,00]	]1,00 - 1,35]	>1,35	≤ 0,70	]0,70 - 0,95]	]0,95 - 1,20]	>1,20
	Chabots (<i>Cottus sp</i>)																			
	Goujons (<i>Gobio sp</i>)																			
	Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>)																			
	Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>)																			
	Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>) Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)																			
10	Able de Heckel (<i>Leucaspis delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	0,05 m	0,05 m	0,05 m	≤ 0,55	]0,55 - 0,75]	]0,75 - 1,00]	>1,00	≤ 0,55	]0,55 - 0,75]	]0,75 - 1,00]	>1,00	≤ 0,55	]0,55 - 0,75]	]0,75 - 1,00]	>1,00
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,02 m	0,10 m	0,15 m	≤ 0,85	]0,85 - 1,15]	]1,15 - 1,60]	>1,60	≤ 0,70	]0,70 - 1,00]	]1,00 - 1,35]	>1,35	≤ 0,70	]0,70 - 0,95]	]0,95 - 1,20]	>1,20
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				

(* Les valeurs fournies pour l'anguille correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage de l'espèce. Dans le cas où l'obstacle présente une zone de reptation en complément, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à la reptation (voir section dédiée au cas particulier de l'anguille).

■ Arbre décisionnel

Pour définir la franchissabilité d'un ouvrage routier ou passage busé présentant une entrée et une sortie dénoyées (voir premier schéma de la Figure 96), la démarche est la suivante (Figure 97).

1- Analyse de l'éventuelle chute aval

Si'il existe une chute en aval de l'ouvrage, il faut alors analyser la franchissabilité de la chute selon le protocole relatif aux seuils verticaux (commencer l'analyse au point 3 de l'arbre spécifique fourni à la section sur les obstacles verticaux ou quasi-verticaux de pente $>150\%$). Si la chute est totalement infranchissable pour l'espèce ou le groupe d'espèces considéré, alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0). Si la chute aval n'est pas totalement infranchissable (Classe ICE > 0), alors poursuivre en 2.

Si'il n'y a pas de chute aval, alors aller en 6.

2- Analyse du tirant d'eau dans l'ouvrage

Si le tirant d'eau dans l'ouvrage $h \geq h_{\min}$ (voir tableau 18), alors le tirant d'eau est suffisant. Aller en 3.

Si $h < h_{\min}$, l'obstacle peut être considéré, dans ces conditions hydrologiques, comme une barrière totale au sens du protocole ICE (Classe ICE = 0). Il convient toutefois de poursuivre l'analyse (aller en 3) afin d'apprécier la classe de franchissabilité dans le cas où des conditions hydrologiques différentes permettraient d'assurer un tirant d'eau suffisant. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il est alors possible de déterminer d'ores et déjà l'utilité de revenir à d'autres conditions hydrologiques.

3- Analyse des redans dans l'ouvrage

Si le site ne présente pas de redans ou si les redans sont considérés comme négligeables ($h \geq 2a$). Aller directement en 4.

Si les dimensions (a et c) d'un seul des redans présents dépassent les valeurs maximales de a_{\max} et c_{\max} fournies dans le tableau 18, alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

Si les dimensions (a, c) de chaque redan sont inférieures aux valeurs seuils, aller en 4.

4- Analyse de la pente de l'ouvrage

A partir de la longueur de l'ouvrage ($L < 20\text{m}$ ou $L > 20\text{m}$) et de sa pente, définir à partir du tableau 18, la classe de franchissabilité de l'ouvrage.

Si la classe ICE = NC, alors aller en 5.

Si Non (Classe ICE \neq NC), aller en 9.

5- Analyse des vitesses d'écoulement

A partir de la longueur de l'ouvrage ($L < 20\text{ m}$, $20\text{m} < L < 50\text{m}$ ou $L > 50\text{m}$), et des vitesses de l'écoulement mesurées ou estimées, définir à partir du tableau 19, la classe de franchissabilité de l'ouvrage en lui-même (Classe ICE). Puis aller en 9.

Si les vitesses de l'écoulement ne peuvent pas être appréciées ou mesurées alors il ne sera pas possible de déterminer la franchissabilité (Classe ICE = NC). Puis aller en 9.

6 - Analyse du calage de l'ouvrage par rapport au terrain naturel du lit du cours d'eau

Regarder si l'ouvrage est calé sur toute sa longueur sous le niveau du terrain naturel.

Si l'ouvrage est calé sous le niveau du terrain naturel, alors aller en 8.

Si Non, aller en 7.

7- Analyse du noyage de l'ouvrage par l'aval

Regarder si l'ouvrage est noyé par le niveau d'eau aval sur toute sa longueur.
Si l'ouvrage est entièrement noyé par le niveau d'eau aval, alors aller en 8
Si Non, aller en 2.

8- Analyse de la largeur de l'ouvrage

Déterminer la largeur cumulée de l'ouvrage (exemple somme des largeurs de dalots) et la comparer à la largeur du lit mouillé du cours d'eau.

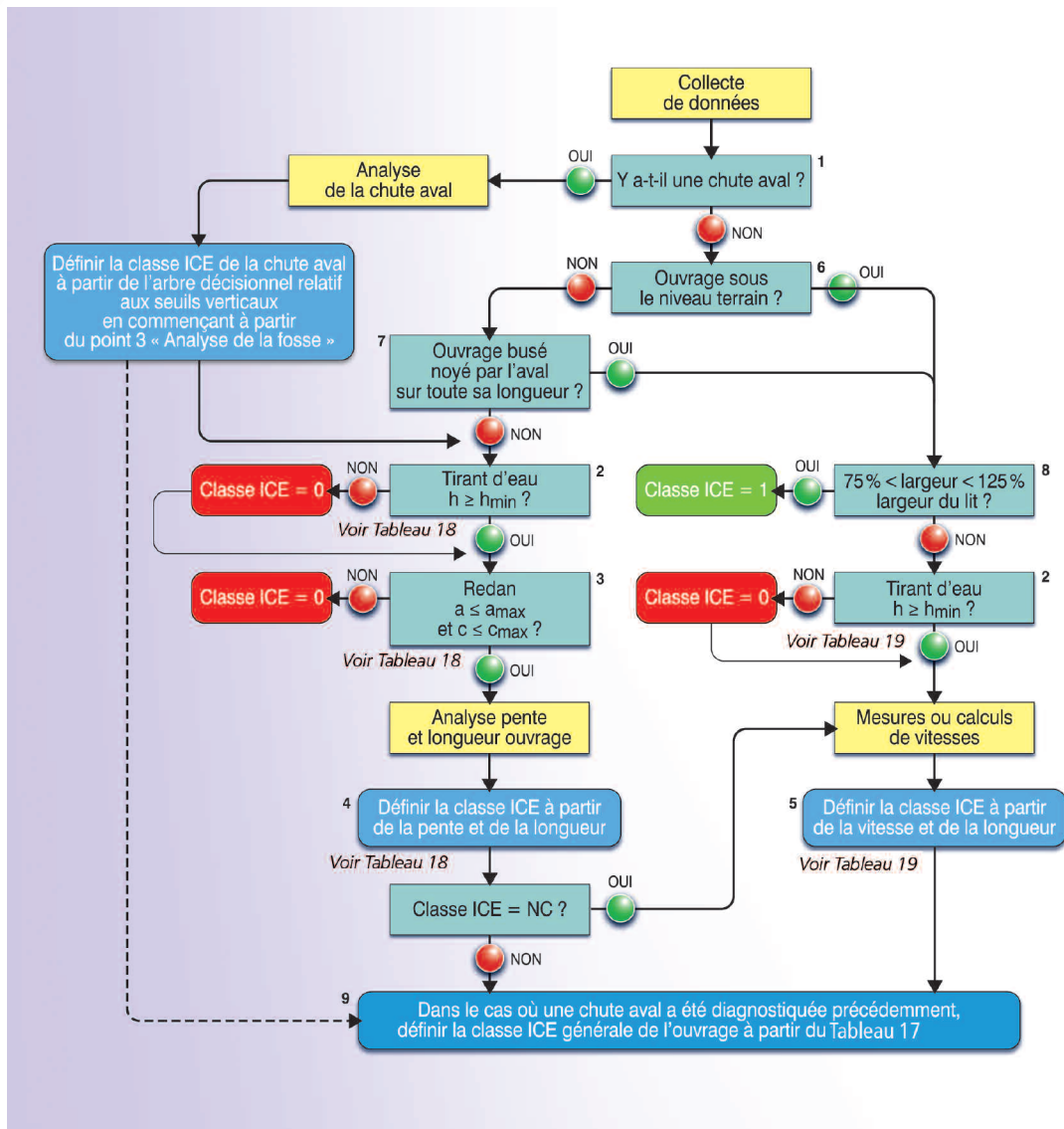
Si la largeur de l'ouvrage est comprise entre 75% et 125% de la largeur du lit, il ne sera pas alors considéré comme un obstacle au franchissement (Classe ICE = 1) et l'analyse sera stoppée.

Si Non, vérifier que le point 2 est respecté ($h \geq h_{\min}$ - voir tableaux 18 ou 19), puis aller en 5.

9- Analyse de l'état de franchissabilité de l'ouvrage

Dans le cas où le site présente une chute aval, définir la classe ICE générale de l'ouvrage à partir du tableau 17. Si le site ne présente pas de chute aval, alors la classe ICE globale sera celle obtenue pour l'ouvrage à des étapes 4 ou 5

Figure 97



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE au niveau d'un ouvrage routier ou passage busé.



Cas des ouvrages de marée

Généralités

Il s'agit d'ouvrages installés sur les parties aval des bassins versants soumises à la marée. Ils contrôlent l'accès à des cours d'eau ou à des zones de marais et constituent souvent les premiers obstacles que rencontrent les poissons, notamment les amphihalins, lors de leur migration anadrome.

Ces obstacles sont destinés généralement à limiter les entrées d'eau salée depuis l'aval tout en facilitant l'évacuation des eaux provenant de l'amont.

Ils disposent souvent de dispositifs mobiles qui se ferment partiellement ou totalement à marée haute pour limiter les entrées d'eau marines. Au cours de la marée descendante (ou jusant), les dispositifs mobiles s'ouvrent et permettent ainsi d'évacuer le volume d'eau amont stocké durant la période où la marée est montante (ou flot) (Figure 98).

Lorsque les enjeux en amont sont importants, des systèmes de pompage peuvent être associés à ces ouvrages afin d'accélérer le processus de vidange. Dans ces cas bien particuliers, des mortalités piscicoles peuvent avoir lieu si les aménagements ne sont pas équipés de systèmes permettant d'empêcher le transit des poissons au travers des pompes.

Figure 98



Exemple des portes à flots au niveau de la Jalle de la Maréchale dans le Médoc (33), (a) à basse mer, (b) à pleine mer.

Dans certains cas, les ouvrages estuariens peuvent jouer le rôle inverse en laissant entrer l'eau lors du flot et en la stockant lors du jusant (Figure 99). L'intérêt est alors souvent de disposer d'un port ou d'un bassin toujours en eaux pour les activités nautiques ou/et touristiques. Sur le plan piscicole, ce type de gestion est généralement bien moins problématique, les migrations anadromes se faisant en effet le plus souvent au flot.

a, b © Voegtli - Ecogea

Figure 99



a, b © Voegtli - Ecogea

Exemple du Lac Marin (sur le Courant de Soustons dans les Landes). (a) au flot, la mer rentre en amont de l'obstacle (lac), (b) au jusant, un seuil permet de retenir l'eau pour éviter que le lac ne se vide.

Les différents types d'ouvrages

Les dispositifs mobiles de fermeture au niveau des ouvrages de protection sont généralement de trois types :

- **les portes à flots.** Elles sont disposées sur des montants verticaux et obstruent généralement toute la largeur du lit. Les dimensions des portes sont souvent conséquentes, ce qui permet d'assurer une évacuation rapide des eaux accumulées en amont pendant le flot ou lors d'épisodes de crue (Figure 100).

Figure 100



a © Voegtli - Ecogea
b © Chanseau - Onema

Exemples de portes à flots. (a) portes à flots installées sur le marais d'Arcins en Gironde. (b) portes à flots installées sur la Livenne.

- **les vannages.** Ces ouvrages sont généralement des vannes levantes ou des vannes à segment (Figure 101).

Figure 101



a © Voegtli - Ecogea

Exemple de vannage.
Vanne levante installée sur le courant de Soustons dans les Landes.

■ **les clapets.** Ils sont généralement de plus petites dimensions que les portes à flots et sont souvent positionnés en partie basse d'ouvrage (Figure 102). Ils sont la plupart du temps de formes carrée ou rectangulaire et s'ouvrent par le bas (montants horizontaux).

Dans certains cas, notamment lorsque les ouvrages estuariens sont fortement sollicités par la houle, ces clapets peuvent être installés en partie amont de buses.

Les buses (ou canaux couverts) présentent parfois des longueurs importantes. C'est le cas notamment pour de nombreuses rivières côtières de la côte d'Albâtre en Seine-Maritime, où les buses estuariennes présentent généralement plusieurs mètres de longueur, afin de déboucher en aval des plages de galets fortement mobiles.

Figure 102



a, b, d, e, f © Voegtli - Ecogea
c © Verdeyroux - Onema

Exemples de clapets à marées. (a) et (b) Clapets mobiles installés dans le Médoc, (c) " Orgues de Staline " installées sur le ruisseau de l'Arroudet, (d) ouvrage composé de portes à flots et de clapets en partie basse (ouvrage situé sur la Jale de Castelnaud), (e et f) ouvrage estuarien situé sur l'Yères composé d'une buse de grande longueur en aval (photos de droite) et d'un clapet en amont (photo de gauche).

La majorité des ouvrages sont équipés de systèmes mobiles " passifs " qui fonctionnent sur les règles de base de l'hydraulique. Dans ce cas, ce sont généralement des portes à flots ou des clapets qui sont installés et qui se ferment dès lors que le niveau d'eau en aval de l'ouvrage est supérieur au niveau d'eau en amont. Il arrive cependant que ces ouvrages soient automatisés. Ce sont alors généralement des ouvrages constitués de vannes levantes ou de clapets.

Diagnostic de la franchissabilité

Les connaissances sur le comportement des poissons au droit des ouvrages de marée, ou relatif à l'influence de la marée sont encore parcellaires en raison notamment de la complexité des expérimentations à mettre en place. Il peut toutefois être avancé que la majorité des espèces concernées profitent de la marée montante pour coloniser les territoires contrôlés par ces ouvrages.

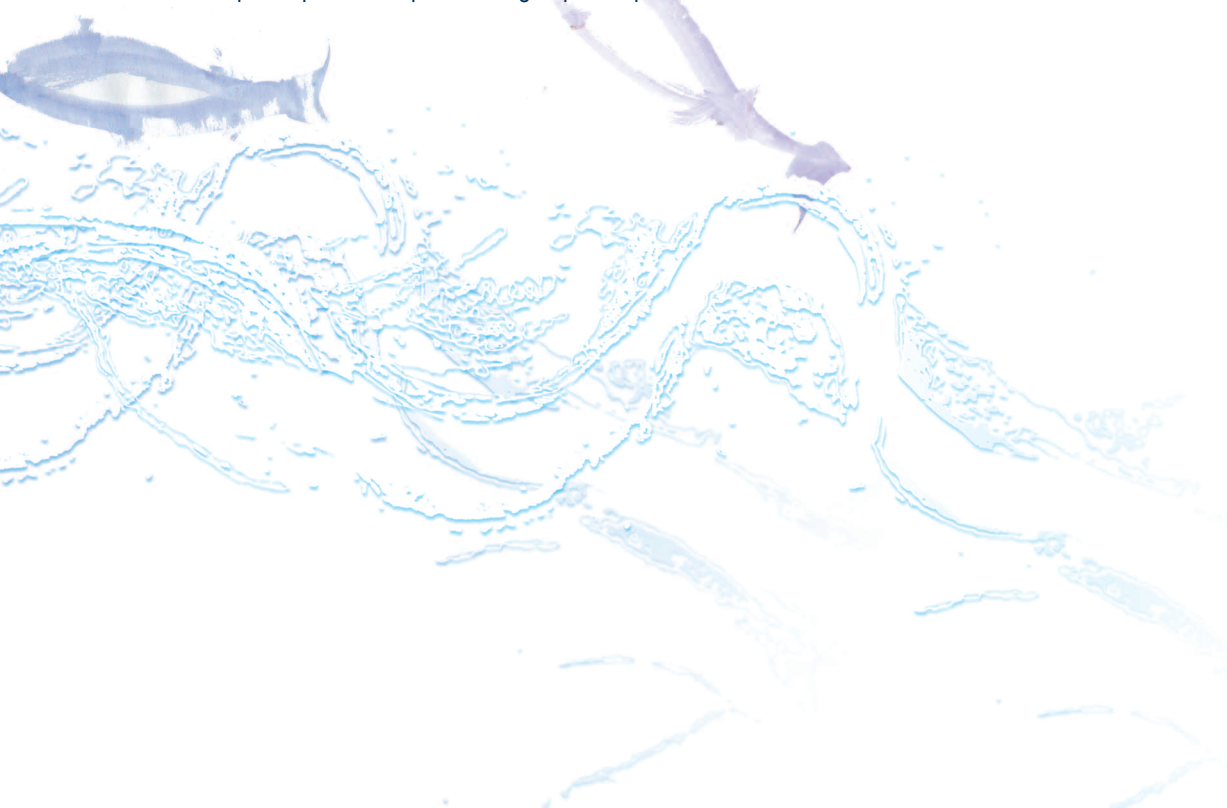
Dans la plupart des cas toutefois, notamment lorsque les ouvrages estuariens sont construits pour éviter ou limiter l'entrée d'eau vers l'amont, les ouvrages sont très problématiques pour le franchissement des espèces piscicoles qui profitent des courants de flot pour progresser vers l'amont. En se fermant avec la marée montante, et en arrêtant l'onde de marée, ils stoppent généralement complètement la migration des poissons.

De plus, les vitesses d'écoulement dans les ouvrages (buses ou/et localement au niveau des clapets) sont souvent trop importantes au jusant et au début du flot et réduisent les possibilités de passage à ces moments de la marée.

Lorsque les ouvrages estuariens jouent le rôle inverse en laissant entrer l'eau lors du flot et en la stockant lors du jusant, ces ouvrages sont alors généralement peu problématiques.

Il paraît ainsi **difficile de proposer des critères simples permettant de diagnostiquer la franchissabilité de tels ouvrages**. Dans la majorité des cas, une analyse des conditions hydrauliques au niveau des ouvrages en fonction des **conditions hydrologiques et maritimes devra être réalisée**. Cette **expertise** devra nécessiter inévitablement une très bonne connaissance de l'évolution des modalités de gestion des ouvrages étudiés et de l'évolution des ouvertures des organes mobiles en fonction des niveaux d'eau aval et amont (coefficient de marée, jusant, flot...).

Cependant, dès lors qu'il n'y a pas de voie de passage possible vers l'amont au jusant (par l'ouvrage directement ou par un dispositif de franchissement spécifique) **ou au flot** (pas d'entrée d'eau possible vers l'amont), **l'ouvrage peut être considéré au final comme une barrière totale ou quasi-totale** (Classe ICE = 0), quelle que soit l'espèce ou le groupe d'espèces considéré.



Cas des obstacles complexes ou mixtes

Les obstacles appelés “ complexes ou mixtes ” sont des ouvrages constitués longitudinalement par des matériaux très différents (seuil à parement vertical ou incliné en béton poursuivi par un seuil en enrochements...) ou correspondant à une série d'obstacles successifs constituant, d'un point de vue administratif, un seul et même ouvrage (seuil de moulin présentant un pré barrage en aval, succession de deux seuils...).

Il a été décidé de décomposer ces ouvrages complexes en une série d'ouvrages “ simples ” (Figure 103), puis de définir la franchissabilité de chacun de ces ouvrages pris séparément et enfin d'établir la classe de franchissabilité de l'ensemble de l'ouvrage, selon les règles détaillées ci-après.

La démarche peut être comparée, dans son principe, à celle développée pour les seuils à parements inclinés ou les passages routiers ou ferroviaires présentant une chute aval (voir sections spécifiques à ceux types d'obstacles).

Décomposition de l'ouvrage en une série longitudinale de plusieurs ouvrages “ simples ”

Chaque partie de l'obstacle doit être classée dans une des cinq typologies suivantes :

- obstacle vertical ou quasi-vertical (pente > 150%) ;
- seuil à parement aval incliné (pente ≤ 150 %) ;
- seuil en enrochements ;
- obstacle constitué d'éléments mobiles ou par un écoulement en sousverse ;
- ouvrage routier ou ferroviaire.

Figure 103



Exemples d'ouvrages complexes pouvant être décomposés en une succession d'ouvrages “ simples ”. (a) exemple d'ouvrage dit “ complexe ou mixte ” pouvant être décomposé comme un seuil à parement incliné présentant en aval un seuil en enrochements, (b) exemple d'ouvrage dit “ complexe ou mixte ” pouvant être décomposé comme un seuil incliné suivi d'une chute verticale (pré barrage).

Cette décomposition ne vaut toutefois que si les conditions hydrauliques au niveau d'un des ouvrages ne sont pas trop influencées par la présence des autres ouvrages (Figure 104).

En théorie, cette démarche peut être appliquée pour une succession illimitée d'ouvrages. Toutefois, au-delà de trois ou quatre ouvrages "simples", il est probable que les conditions hydrauliques deviennent complexes et ne puissent être appréhendées de façon simple.

Dans ces cas de figures, le diagnostic devrait nécessiter en toute rigueur une analyse plus poussée passant par une modélisation hydraulique permettant de décrire les conditions d'écoulement le long de l'ouvrage en fonction de l'hydrologie. Cette modélisation hydraulique impliquera la construction et le calage d'un modèle numérique à partir des données physiques de l'ouvrage général (géométrie précise de l'ouvrage, rugosités) et hydrauliques (débits, conditions aux limites aval et amont en fonction des débits...). **Dans un premier temps toutefois, il paraît judicieux d'effectuer l'analyse comme un ouvrage complexe. La classe de franchissabilité sera alors considérée comme une classe "maximale" (Classe ICE de l'ouvrage \leq Classe obtenue par décomposition). Suivant la classe de franchissabilité obtenue en poursuivant l'analyse, il est alors possible de déterminer d'ores et déjà l'utilité d'avoir recours à une modélisation hydraulique.**

Figure 104



Exemples d'ouvrages ne pouvant pas être décomposés en ouvrages simples.

(a) deux ouvrages "simples". La vitesse initiale en amont du seuil incliné est beaucoup plus importante (vitesse en sortie de vannage très forte) que dans le cas d'un seuil incliné classique sur lequel la mise en vitesse s'effectue progressivement. Cependant, une modélisation hydraulique s'avère inutile dans ce cas de figure, puisque le passage sous la vanne est d'ores et déjà infranchissable. L'ouvrage général peut donc être considéré comme une barrière totale (Classe ICE =0).

(b) dans ce cas de figure, l'ouvrage ne peut pas être décomposé en trois ouvrages simples (chute aval, seuil incliné et passage sous vanne). La vitesse initiale en amont du seuil incliné est beaucoup plus importante (vitesse en sortie de vannage très forte) que dans le cas d'un seuil incliné classique sur lequel la mise en vitesse s'effectue progressivement.

a © Voegtli Ecogea
b © Richard - Onema

Définition des classes de franchissabilité de chacun des ouvrages individualisés

Les classes de franchissabilité de chacune des parties simplifiées de l'obstacle général seront définies en suivant les méthodologies adaptées à chacune des typologies d'ouvrages et détaillées dans les chapitres précédents.

Définition de la classe de franchissabilité globale de l'ouvrage

De manière à prendre en compte le cumul des impacts, il est proposé de dégrader la franchissabilité de l'ouvrage d'une à deux classes suivant les configurations.

Le tableau 20 présente les résultats dans le cas où l'ouvrage est constitué d'une série de deux obstacles "simples".

Tableau

20

Matrice permettant de calculer la classe ICE générale d'un obstacle complexe constitué par une série de deux ouvrages simples.

Classe ICE de l'ouvrage amont	Classe ICE de la chute aval			
	0	0,33	0,66	1
0	0	0	0	0
0,33	0	0	0,33	0,33
0,66	0	0,33	0,33	0,66
1	0	0,33	0,66	1
NC	0	NC ($\leq 0,33$)	NC ($\leq 0,66$)	NC

Pour une décomposition en n ouvrages "simples", il a été décidé que la classe de franchissabilité de l'ouvrage correspond à celle de l'ouvrage "simple" le plus impactant dégradé d'une classe dès lors qu'il existe a minima trois parties présentant une classe ICE inférieure à 1.

Dans le cas où seulement 2 des n parties de l'obstacle sont déclassantes (les autres parties ayant une classe ICE = 1), le tableau 20 sera utilisé.

A titre d'exemples :

- pour un obstacle constitué de n ouvrages "simples" ayant chacun une classe de franchissabilité ICE de 0,66, l'obstacle pourra être considéré comme une barrière à impact majeur (classe ICE de l'obstacle général = 0,33 : utilisation du tableau 20 si n=2 ou dégradation d'une classe de la partie la plus déclassante si n \geq 3) ;
- pour un obstacle constitué de n ouvrages "simples" ayant chacun une classe de franchissabilité ICE de 0,33, l'obstacle général pourra être considéré comme une barrière totale (classe ICE de l'obstacle général = 0 : utilisation du tableau 20 si n=2 ou dégradation d'une classe de la partie la plus déclassante si n \geq 3) ;
- pour un obstacle constitué de 4 ouvrages "simples" ayant respectivement une classe de franchissabilité ICE de 0,33, 0,66, 0,66 et 1, l'obstacle général pourra être considéré comme une barrière totale (classe ICE = 0 : dégradation d'une classe de la partie la plus déclassante) ;
- pour un obstacle constitué de 4 ouvrages "simples" ayant respectivement une classe de franchissabilité ICE de 0,33, 0,66, 1 et 1, l'obstacle général pourra être considéré comme une barrière à impact majeur (classe ICE de l'obstacle général = 0,33 : utilisation du tableau 20).



Le cas particulier de l'anguille

Approche spécifique

■ Généralités

A la montaison, l'anguille est capable de franchir les obstacles en utilisant deux modes de déplacement :

- soit la nage dans des écoulements à faibles vitesses (inférieure à 0,5 m/s pour les civelles ; de l'ordre de 1-1,5 m/s pour l'anguillette et l'anguille jaune) ;
- soit la reptation sur des surfaces inclinées et rugueuses, très faiblement alimentées en eau.

L'évaluation du niveau de franchissabilité d'un obstacle à la montaison pour l'anguille a fait l'objet d'une approche dès 2006 dans le bassin Loire-Bretagne (Steinbach, 2006). Les principes généraux de cette démarche seront repris ultérieurement.

■ Taille des individus

Dans le cadre du protocole ICE, sont pris en compte les individus susceptibles de se déplacer de façon conséquente sur les territoires (à l'échelle de l'aire de répartition continentale de l'espèce), c'est-à-dire les jeunes individus dont la taille se situe entre 60 mm et 120 mm (stade civelle), et les individus de plus grande taille jusqu'à 400 mm (stade anguillette ou anguille jaune).

Les plus petits individus sont capables de franchir " par escalade " des parois verticales sans avoir besoin d'appuis. Ils semblent utiliser les forces de tension superficielle créées entre leurs corps et la paroi humide qui permettent de compenser la force de pesanteur (Legault, 1986 et 1987). Au cours de sa croissance, le rapport poids/tension superficielle augmente, ce qui explique que seuls les plus petits individus (de taille inférieure à une douzaine de cm) peuvent utiliser ce mode de progression.

A contrario, les stades plus avancés (anguillette et anguille jaune) présentent des capacités de nage supérieures à celles des civelles. Ces facultés leur permettent de franchir par la nage certains ouvrages de petite chute lorsque la reptation n'est pas possible.

Aussi, pour prendre en compte les spécificités de chacun de ces stades, deux groupes distincts ont été individualisés :

- le stade " civelle et jeune anguillette " qui correspond aux individus de 6 à 120 mm ;
- le stade " anguillette et anguille jaune " qui correspond à des individus de taille supérieure à 120 mm.

■ Critères de franchissement et prise en compte des capacités de reptation

Au vu de ses capacités de nage, il peut être considéré que tout obstacle présentant une chute constitue un obstacle majeur pour le stade " civelle et jeune anguillette " dès lors que celle-ci doit franchir l'ouvrage par nage. Pour le stade " anguillette et anguille jaune ", des limites de classe de franchissabilité ont été définies dans les tableaux associés aux différents arbres comme pour les autres espèces selon les typologies d'obstacles (voir sections précédentes dédiées à chaque type d'obstacles).

Cependant, le diagnostic de la franchissabilité d'un ouvrage pour l'anguille doit prendre en compte les capacités spécifiques de reptation de l'espèce (ou d' "escalade" pour les plus jeunes stades). Il est donc apparu nécessaire de définir des critères de franchissement spécifiques à ce mode de progression.

La méthode proposée consiste dans un premier temps à vérifier l'existence d'une voie de reptation potentielle pour le poisson, puis d'apprécier l'état de franchissabilité de cette voie à partir de deux paramètres simples à mesurer ou à estimer : la distance à franchir et la pente moyenne de la voie de reptation. Le diagnostic est alors réalisé comme suit.

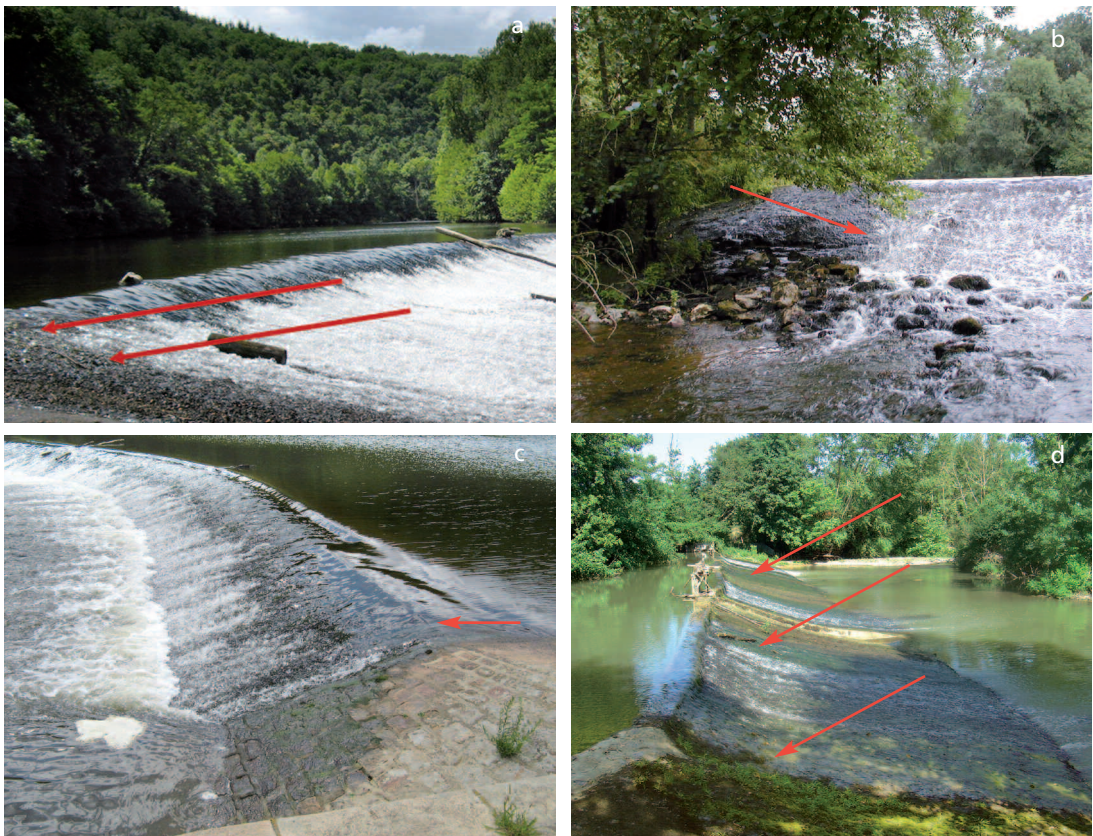
Existe-t-il une voie de reptation ?

La présence de rugosités sur un substrat peut aider l'anguille à progresser, en particulier sur les fortes pentes. L'efficacité de ces éléments de rugosités dépend de leur taille dans plusieurs dimensions et de leur espacement dans différentes directions. La combinaison de ces multiples composantes et leur hétérogénéité à l'échelle d'un ouvrage rendent ce critère très difficile à caractériser et à mesurer précisément.

Il a ainsi été décidé d'intégrer le paramètre rugosité à travers une seule donnée qualitative : l'existence ou non d'une voie de reptation exploitable par l'anguille, à l'échelle de l'ouvrage ou de sa partie transversale considérée.

Cette voie de reptation se caractérise par la présence d'une zone continue à faible tirant d'eau sur l'ouvrage (inférieur au centimètre pour la civelle et inférieur à 2 cm pour l'anguillette) (Figure 105).

Figure 105



a, b, c © Steimbach - Onema
d © Chanseau - Onema

Exemples de voie de reptation.

Dans le cas où aucune voie de reptation n'existe sur l'ouvrage, l'anguille doit utiliser ses seules capacités de nage pour franchir l'obstacle. Il conviendra alors de se rapporter aux arbres décisionnels définis précédemment (voir sections précédentes dédiées à chaque type d'obstacles) pour le stade anguillette.

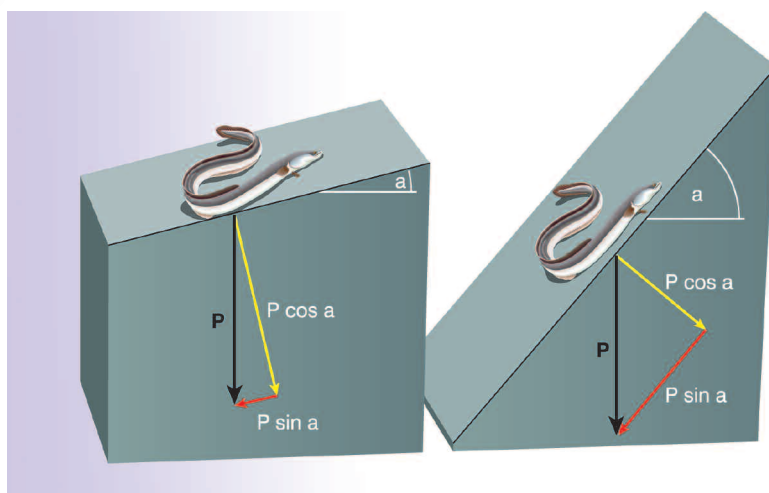
Pour le stade civelle, qui ne présente pas de réelles capacités de nage, l'obstacle peut dès lors être considéré comme une barrière totale (classe ICE = 0).

Pente

Sur la base notamment des résultats issus des expérimentations menées sur des équipements pilotes (Legault, 1989 ; Voegtli et Larinier, 2000), il a été considéré que la pente de la voie de reptation potentielle constituait le principal critère à prendre en compte pour caractériser les difficultés de franchissement d'un obstacle.

Le poids du poisson peut être décomposé en une composante normale ($P \cos a$) et une composante tangentielle ($P \sin a$) (Figure 106). La part de son poids que l'anguille a à vaincre lors de la reptation est proportionnelle à $\sin a$. La composante du poids qui vient s'ajouter à la tension superficielle pour plaquer l'anguille sur le substrat est proportionnelle à $\cos a$, a étant la pente du substrat exprimée en unité d'angle ($^\circ$).

Figure 106



Décomposition du poids en deux composantes (une composante favorable au maintien du poisson contre la paroi et une composante défavorable).

Pour les pentes les plus faibles, inférieures ou égales à 20-30% (référence utilisée 15°; Voegtli et Larinier, 2000), l'anguille est moins sensible aux défauts de rugosité ou aux augmentations de charge hydraulique. Elle n'a à vaincre qu'une faible fraction de son poids lorsqu'elle se déplace. Plus de 90% de son poids lui sert à rester plaquée contre ces rugosités, ce qui fait qu'elle n'a pas à recourir à la tension superficielle (Tableau 21). Cette gamme de faibles pentes correspond également aux conditions d'écoulement en nappe au travers desquels l'anguille peut éventuellement progresser plus rapidement en nageant, si la charge le permet.

Tableau 21

Décomposition du poids en deux composantes.

	Pente (% ou °)									
	14% 8°	32% 18°	48% 26°	100% 45°	130% 53°	173% 60°	230% 66°	300% 72°	500% 79°	∞ 90°
$\cos a$	0,99	0,95	0,90	0,70	0,60	0,50	0,40	0,31	0,20	0,00
$\sin a$	0,14	0,31	0,43	0,70	0,80	0,87	0,91	0,95	0,98	1,00

A partir de pentes de 100-175% (45°-60°), les individus auront beaucoup plus d'efforts à fournir pour progresser dans la mesure où ils devront " tirer " une grosse partie de leur poids (70-90%) alors qu'ils auront perdu 30 à 45% de la composante du poids leur permettant de s'appuyer sur le substrat. Seule la tension superficielle peut alors les aider à se maintenir sur le substrat. Dans ces conditions, les plus petits individus seront favorisés. Des rugosités présentes sur la zone de reptation peuvent alors les aider à progresser. L'efficacité de ces éléments de rugosités dépend de leur taille dans plusieurs dimensions et de leur espacement dans différentes directions en lien avec la taille des individus.

La réduction de la pente augmente la tolérance de l'anguille à deux autres facteurs limitants, la rugosité de la surface de reptation et la charge hydraulique, qui ne peuvent pas être mesurés précisément.

Distance à franchir

De façon pragmatique, et en l'état actuel des connaissances, il a été considéré que plus la distance à franchir est importante et plus la probabilité pour l'anguille de rencontrer des conditions de vitesses excessives, des charges inadaptées, des zones trop lisses ou des ruptures de pente incompatibles avec ses capacités de reptation augmente. De plus, l'individu se fatiguera d'autant plus vite que la pente sera importante. Il est ainsi proposé, sur la base de tableaux à double entrée, de déterminer la franchissabilité des ouvrages en croisant, pour ce qui concerne la voie de reptation potentielle, la longueur à franchir et la pente du parement. Dans le cas où la voie de reptation est hétérogène (différentes pentes), les différentes parties devront être distinguées et analysées séparément.

Détermination de la classe de franchissabilité

■ Valeurs seuils associés à l'arbre décisionnel

Les tableaux 22 et 23 ci-après présentent les différentes classes de franchissabilité en fonction de la pente et de la distance à franchir. Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 107) permettant de définir la classe de la franchissabilité ICE d'un ouvrage donné.

NB Le protocole ICE est essentiellement dédié aux obstacles anthropiques. Il est toutefois intéressant de noter que dans le cas d'un obstacle naturel (cascade, cassé...), l'hétérogénéité de la paroi et des écoulements peut parfois favoriser le franchissement des anguilles et notamment des civelles, par rapport à une structure artificielle. Dans ce contexte très particulier, le résultat d'un diagnostic ICE pourrait donc largement sous-estimer la franchissabilité, notamment lorsque des zones de repos ponctuelles existent sur l'obstacle naturel. A l'échelle de la civelle, il ne peut plus alors être considéré comme un seul obstacle, mais comme une succession d'obstacles.

Tableau 22 Matrice permettant de calculer la classe de franchissabilité ICE d'ouvrages présentant une zone de reptation pour la civelle (60mm-120 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage, et à l'aide de l'arbre de décision de la figure 107.

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 5	1	1	1	1	1	1	1
5 < P ≤ 12.5	1	1	1	1	0,66	0,66	0,66
12.5 < P ≤ 25	1	1	1	1	0,66	0,66	0,66
25 < P ≤ 50	1	1	1	0,66	0,66	0,66	0,33
50 < P ≤ 75	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
75 < P ≤ 100	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33
100 < P ≤ 150	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0
150 < P ≤ 300	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0	0
P > 300	0,66	0,66	0,66	0,33	0	0	0

Tableau 23 Matrice permettant de calculer la classe de franchissabilité ICE d'ouvrages présentant une zone de reptation pour l'anguillette (120 mm- 400 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage, et à l'aide de l'arbre de décision de la figure 107.

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 5	1	1	1	1	1	1	1
5 < P ≤ 12.5	1	1	1	1	1	0,66	0,66
12.5 < P ≤ 25	1	1	1	1	0,66	0,66	0,33
25 < P ≤ 50	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
50 < P ≤ 75	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0
75 < P ≤ 100	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0	0
100 < P ≤ 150	1	0,66	0,33	0,33	0	0	0
150 < P ≤ 300	0,66	0,33	0,33	0	0	0	0
P > 300	0,66	0,33	0	0	0	0	0

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir l'état de franchissabilité d'un obstacle pour l'anguille sont les suivantes.

1. Existe-t-il une voie de reptation ?

Si'il existe une voie continue à faible tirant d'eau (<2 cm environ pour l'anguillette et <1 cm pour la civelle), alors effectuer un profil en long au niveau de cette voie de reptation potentielle et aller en 3.

Si Non, l'anguille est obligée d'utiliser ses capacités de nage et aller en 2.

Cependant, dans le cas où il n'est pas possible d'identifier une voie de reptation, il peut être intéressant d'apprécier la classe de franchissabilité pour des conditions hydrologiques plus favorables pouvant se traduire par l'apparition d'une voie de reptation. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse (aller en 3), il est d'ores et déjà possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site pour des débits différents.

2. Analyse de la classe de franchissabilité générale de l'obstacle en cas d'absence de voie de reptation

Pour le stade anguillette, analyser l'état de franchissabilité en utilisant les tableaux décisionnels relatifs aux différentes typologies d'ouvrages selon la même méthodologie que les autres espèces piscicoles.

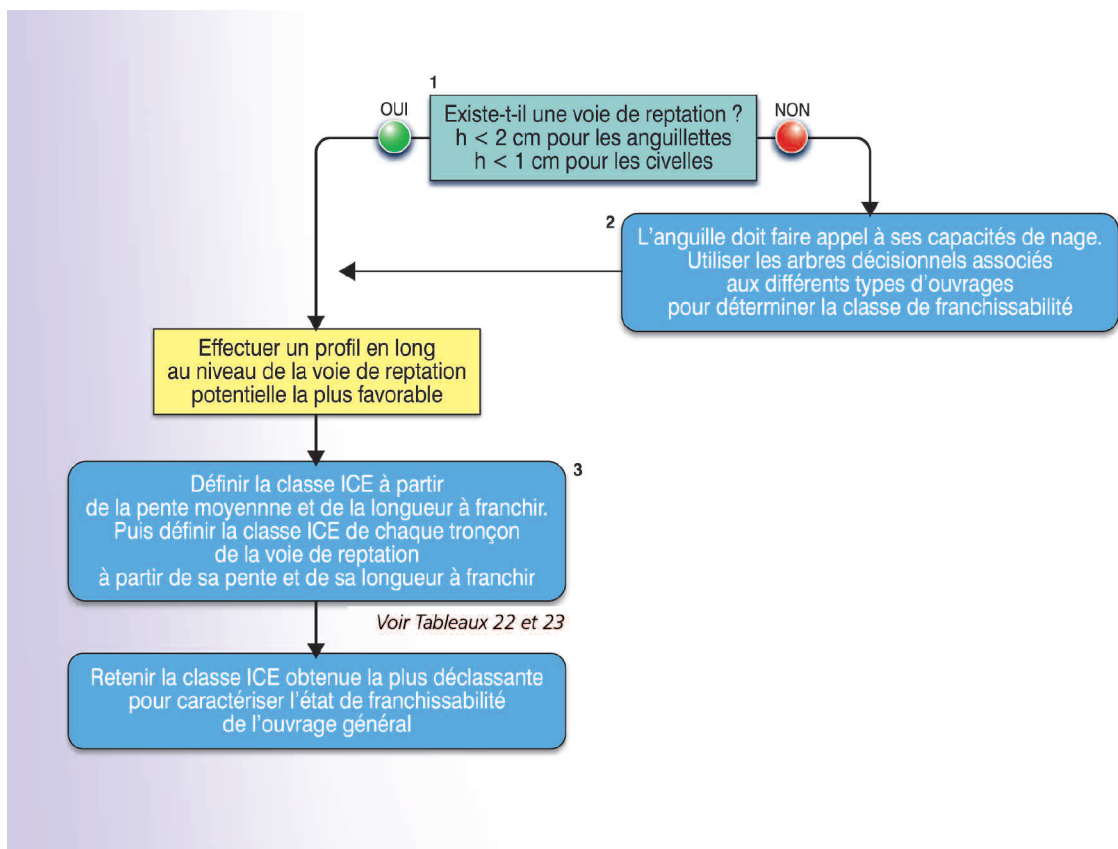
Pour le stade civelle, l'obstacle sera considéré comme une barrière totale (classe ICE = 0).

3. Analyse de la classe de franchissabilité générale de l'obstacle par reptation

Analyser l'état de franchissabilité (classe ICE) en utilisant les tableaux précédents 22 et 23 à partir de la distance totale cumulée et de la pente moyenne de la voie de reptation.

Puis, si la voie de reptation a été décomposée en plusieurs parties, déterminer la classe de franchissabilité de chaque partie en utilisant également les tableaux précédents. Si une ou plusieurs parties présente(nt) une classe de franchissabilité plus faible que la classe générale obtenue au préalable, alors retenir la classe de franchissabilité de la partie la plus déclassante.

Figure 107



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour les anguilles.

Pré-diagnostic pour les obstacles équipés de dispositifs de franchissement piscicole

152 ■ Les différents types de dispositifs

168 ■ Pré-diagnostic des différents dispositifs de franchissement



Les différents types de dispositifs

Ce chapitre présente les principaux types de dispositifs de franchissement piscicole susceptibles d'être rencontrés sur un ouvrage et en présente les grands principes.

Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à des guides techniques de dimensionnement, comme par exemple :

■ Larinier M., Porcher J.P., Travade F., Gosset C. (1994). *Passes à poissons. Expertise, Conception des ouvrages de franchissement. Conseil Supérieur de la Pêche. Collection Mise au point ;*

■ Larinier M., Courret D., Gomes P. (2006). *Guide technique pour la conception des passes « naturelles ». Rapport Ghaappe RA.06.05-V1.*

Les éléments présentés ci-dessous sont extraits pour l'essentiel de ces deux guides consultables sur le portail eaufrance (www.documentation.eaufrance.fr).

Les passes à bassins

■ Principe des passes à bassins successifs

Le principe de la passe à bassins consiste à diviser la hauteur à franchir en plusieurs petites chutes formant une série de bassins. Le passage de l'eau d'un bassin à l'autre peut s'effectuer soit par déversement de surface, 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. Il existe également des passes de type mixte, l'écoulement se faisant, par exemple, à la fois par déversement au-dessus de la cloison et à travers un orifice noyé.

Les principaux paramètres d'une passe à bassins sont les dimensions des bassins et les caractéristiques géométriques des cloisons, caractéristiques géométriques qui, en fonction des cotes des niveaux d'eau à l'amont et à l'aval de l'ouvrage, déterminent le comportement hydraulique de la passe (débit, chute entre bassins, configuration de l'écoulement dans les bassins).

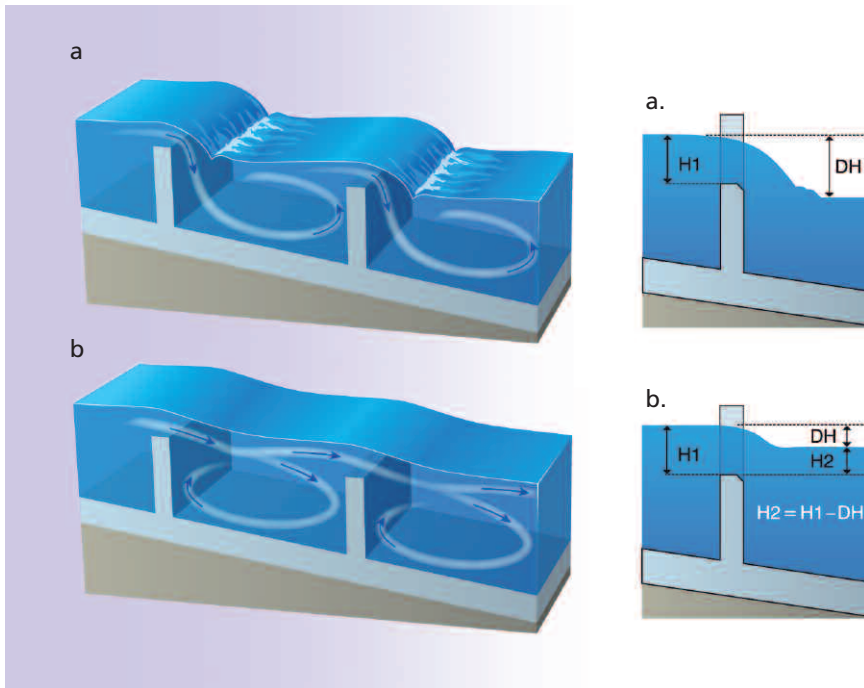
■ Dénivellation entre bassins et nature des écoulements

Les chutes entre bassins (DH) sont fonction des capacités de nage ou de saut des espèces cibles.

L'écoulement peut être soit à "jet plongeant" (Figure 108a), soit à "jet de surface" (Figure 108b). Dans l'écoulement à "jet plongeant", le jet qui se forme au niveau de chaque déversoir plonge vers le fond du bassin. L'énergie est dissipée par mélange turbulent et dispersion dans un ressaut situé au pied de la chute. Le poisson doit alors sauter dans la lame d'eau pour passer d'un bassin à l'autre. Les écoulements à "jet plongeant" sont à éviter impérativement pour les espèces non sauteuses.

Dans le mode d'écoulement à "jet de surface", l'énergie se dissipe dans le bassin aval en créant de grandes zones de recirculation. Ce type d'écoulement se produit lorsque le niveau d'eau aval se situe au-dessus de la crête de déversement et que le tirant d'eau aval au-dessus de cette crête atteint environ 0,5 fois la charge amont.

Figure 108



Modes d'écoulements au niveau des cloisons d'une passe à bassins. (a) Écoulement à jet plongeant, (b) Écoulement à jet de surface.

■ Dimensions des bassins

La longueur minimale des bassins est fonction notamment de la taille des poissons à faire transiter. Il est généralement préconisé une longueur minimale des bassins de l'ordre de 2,5 à 3 fois la longueur du plus grand poisson à faire passer.

De même, la profondeur minimale des bassins est fonction de l'espèce concernée. Pour les grands salmonidés migrateurs, une profondeur minimale de l'ordre du mètre doit être recherchée. Pour les truites, des valeurs plus faibles de l'ordre de soixante quinze centimètres peuvent être adoptées.

Dans les passes à "jet plongeant", la profondeur d'eau au droit de la chute doit être au minimum égale à 2 fois la chute entre bassins pour que le poisson puisse prendre aisément son appel.

En pratique, ce sont cependant le plus souvent les conditions hydrodynamiques (débit, chutes entre bassins, configuration des jets) qui déterminent les dimensions minimales des bassins.

La difficulté de passage des migrateurs augmente avec la turbulence et l'aération dans les bassins. Un indicateur simple du niveau d'agitation dans les bassins est la puissance dissipée volumique (P_v) exprimée en W/m^3 .

■ Dimensions minimales des échancrures, orifices et fentes

Pour les écoulements à "jet de surface", les échancrures ou fentes doivent présenter des largeurs minimales généralement voisines de 0,30 m à 0,40 m pour les grands salmonidés migrateurs, de 0,40 à 0,50 m pour l'aloise, de 0,25 m pour les cyprinidés d'eaux vives et de 0,15 m pour les très petites espèces.

Pour les écoulements à "jet plongeant", il convient de prendre des largeurs sensiblement plus importantes, surtout si le poisson doit franchement sauter pour accéder au bassin supérieur.

Quelle que soit l'espèce considérée, même de petite taille, il convient d'adopter des passages suffisamment larges (supérieurs à 0,15-0,20 m) pour éviter de rendre l'ouvrage trop vulnérable au colmatage.

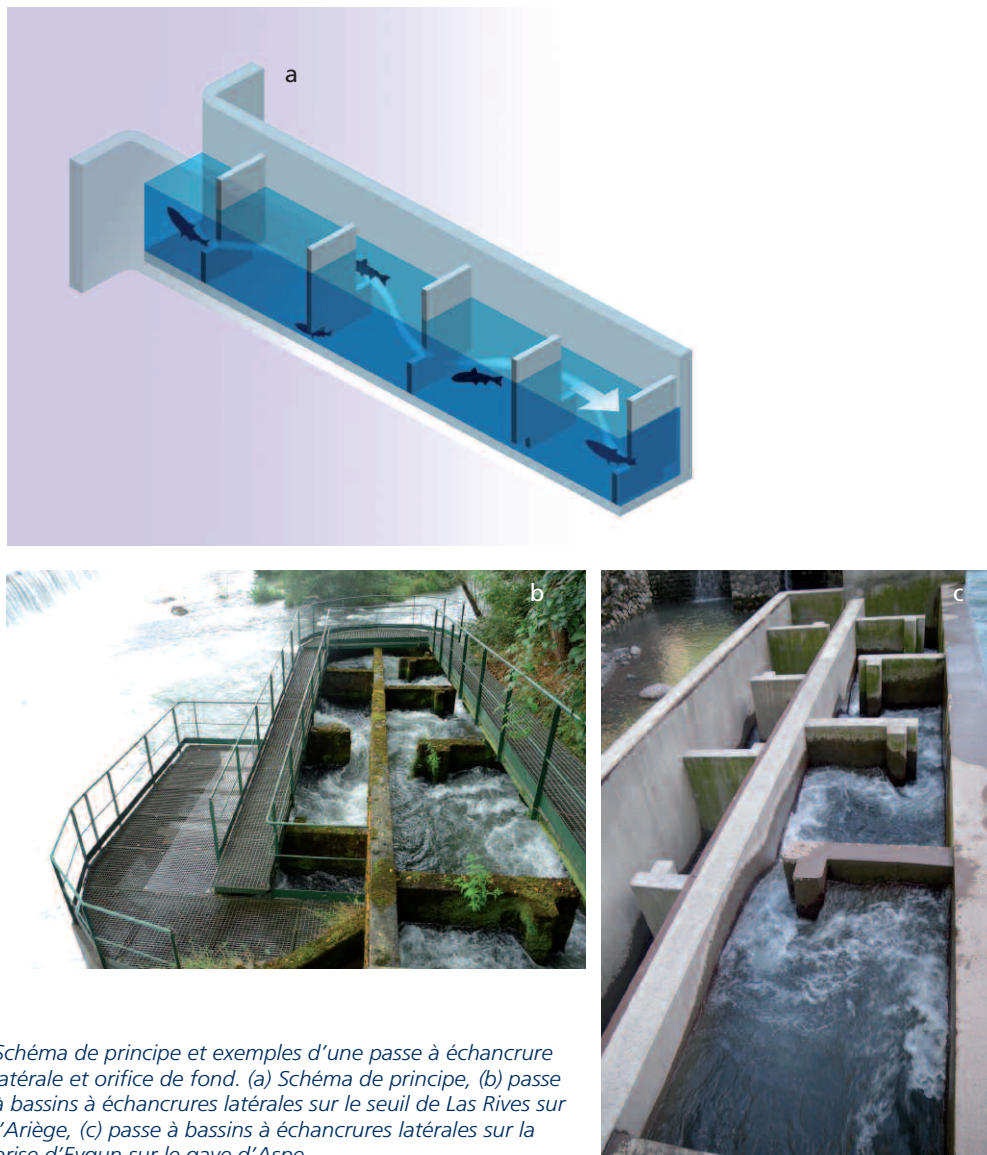
Dans le cas d'orifices de fond destinés au passage de poissons, les surfaces minimales généralement adoptées sont de l'ordre de 0,10 m² pour les poissons de grande taille, et de l'ordre de 0,03 m² pour la truite et la plupart des cyprinidés.

■ Les principaux types de passes à bassins

Les passes à échancrures latérales profondes et à orifices noyés

La communication entre bassins s'effectue par des échancrures latérales et des orifices de fond situés à l'opposé l'un de l'autre et dont les positions sont alternées d'un bassin à l'autre. Un déflecteur fixé sur la face amont de la cloison stabilise l'écoulement et réduit le décollement dans l'échancrure (Figure 109abc).

Figure 109



b © Mayeras - Ecogea
c © Voegtli - Ecogea

Schéma de principe et exemples d'une passe à échancrure latérale et orifice de fond. (a) Schéma de principe, (b) passe à bassins à échancrures latérales sur le seuil de Las Rives sur l'Ariège, (c) passe à bassins à échancrures latérales sur la prise d'Eygun sur le gave d'Aspe.

Les passes à fentes verticales

Les jets issus des fentes (dans le cas de deux fentes) convergent et se rencontrent dans la partie centrale, procurant une dissipation d'énergie efficace et créant des zones calmes sur chaque côté du bassin et à l'aval immédiat des cloisons (Figure 110abc).

Le gros avantage de la passe à fentes verticales est qu'elle supporte des variations importantes du niveau amont, à condition que le niveau aval subisse des variations du même ordre de grandeur.

Par ailleurs, si la fente se prolonge jusqu'au fond du bassin, ce type de passe peut convenir aussi bien aux espèces benthiques qu'aux espèces de pleine eau grâce au gradient de vitesse de courant disponible.

Figure 110



b, c © Voegtli - Ecogea

Schéma de principe d'une passe à fente verticale et exemples de passes à fente(s) verticale(s). (a) Schéma de principe, (b) passe à bassins à double fente verticale située au barrage du Coy sur le gave de Pau, (c) passe à bassins à fente verticale située à l'usine de Susmiou sur le gave d'Oloron.

Les passes à échancrures triangulaires

Le concept de passes à bassins à seuils triangulaires a été développé dans le but de disposer d'ouvrages susceptibles de fonctionner dans une large gamme de débits et de niveaux amont sans qu'il soit nécessaire d'ajouter un débit d'appoint dans la section aval ou un dispositif régulant le débit à l'amont. Pour ce type de dispositif, la communication entre bassins se fait par surverse sur la cloison. Le profil de la cloison est

généralement triangulaire ou semi-triangulaire. On obtient alors généralement un fonctionnement mixte avec un jet de surface dans la partie basse de la cloison et un jet plongeant latéralement (Figure 111ab).

En hautes eaux, un jet de surface à forte vitesse se forme notamment dans la partie centrale de la passe tandis que l'écoulement latéral reste toujours praticable pour le poisson. La passe triangulaire se comporte comme une passe à bassins successifs en basses eaux et un chenal rugueux en hautes eaux. Il n'est donc pas opportun de raisonner en termes de puissance dissipée volumique maximale au niveau d'un bassin.

Figure 111



Exemples de passes à échancrures triangulaires. (a) Passe à seuils triangulaires de Sarrancolin sur la Neste, (b) passe à seuils triangulaires de Jaulnes sur la Seine.

Les prébarrages

Les prébarrages constituent souvent une solution élégante pour résoudre le problème de franchissement sur les obstacles de faible hauteur. Ils sont formés de plusieurs murs ou seuils créant à l'aval de l'obstacle des grands bassins qui fractionnent la chute à franchir (Figure 112ab). Ces prébarrages sont généralement installés à proximité de l'une des deux rives pour en faciliter l'entretien. Sur les petits cours d'eau, ils peuvent être implantés sans inconvénient sur toute la largeur de l'obstacle.

L'écoulement entre deux bassins étant généralement de type plongeant et la chute entre bassins supérieure à 0,40-0,50 m, ce type de passe convient aux espèces qui sautent et plus spécifiquement aux salmonidés. Cependant et notamment dans le cas d'obstacle de hauteur limité, ce type de passe peut également être bien adapté aux exigences d'espèces moins sportives en réduisant la chute entre bassins et en aménageant des écoulements entre bassins à jets de surfaces.

Figure 112



Exemples de prébarrages. (a) Prébarrages au barrage de Guilhot sur l'Ariège, (b) prébarrages au barrage de Gurmençon sur le gave d'Aspe.

Les passes dites « rampes en enrochements »

Les passes dites "rampes en enrochements" consistent à relier le bief amont et aval par un chenal dans lequel l'énergie est dissipée par des rugosités de fond et de parois et/ou par une succession d'obstacles (blocs, épis, seuils...) plus ou moins régulièrement répartis de sorte à créer une voie de passage.

Ce sont des dispositifs qui reproduisent grossièrement les caractéristiques d'un cours d'eau naturel à forte pente. Ils nécessitent généralement la mise en place de blocs d'enrochements pour dissiper l'énergie, réduire les vitesses d'écoulements et augmenter les tirants d'eau.

La pente est plutôt faible par rapport aux autres dispositifs et peut varier de 1-2% à au plus 8-10% suivant les espèces ciblées.

Le dispositif peut être installé sur tout ou partie de la largeur de l'obstacle ou en rive (rivière de contournement).

Deux principaux types de passes rustiques en enrochements peuvent être distingués suivant la manière dont est dissipée l'énergie par les singularités :

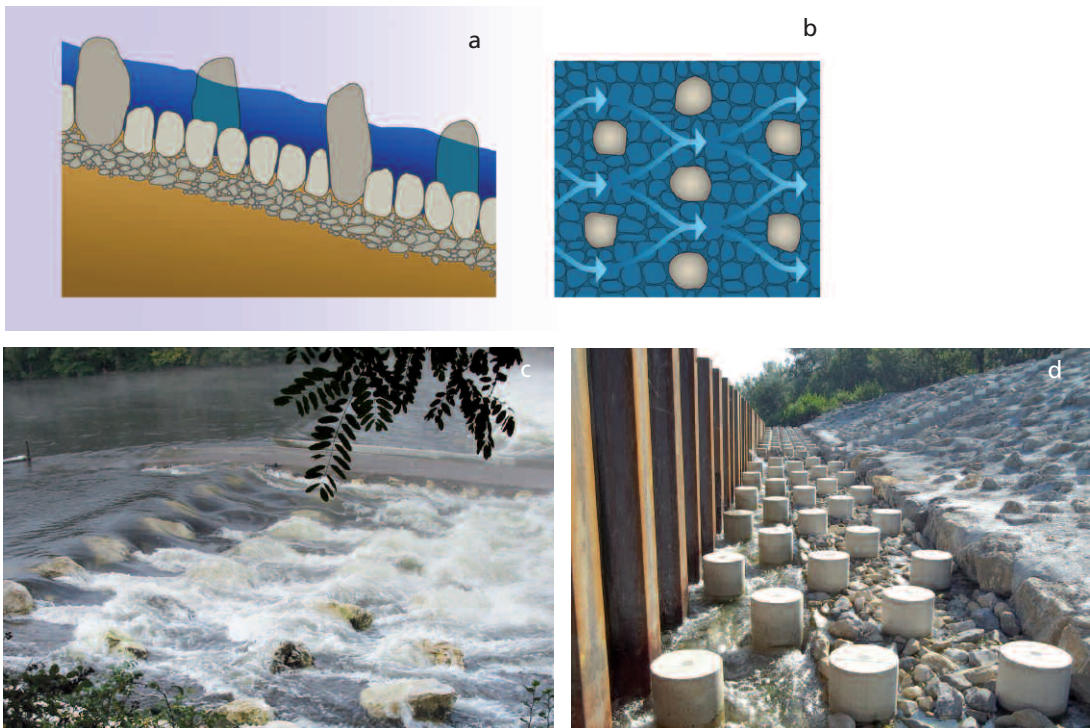
- les passes à singularités régulièrement réparties ;
- les passes à rangées périodiques.

Les rampes constituées d'enrochements jointifs, disposés les uns contre les autres de manière compacte et formant ainsi un tapis rugueux, sont rapidement sélectives. Aussi, **elles ne peuvent être considérées comme de véritables dispositifs de franchissement que lorsque la pente longitudinale de la rampe reste très faible et inférieure à 3%.**

Les rampes à singularités régulièrement réparties

Dans cette configuration, l'énergie est dissipée par des singularités constituées de blocs isolés plus ou moins régulièrement répartis sur le coursier en enrochements (Figure 113abc).

Figure 113



Principes et exemples d'une rampe en enrochements à singularités régulièrement réparties.

(a) et (b) Principes d'une rampe à enrochements régulièrement répartis, (c) dispositif au seuil de Carennac sur la Dordogne (46), (d) dispositif sur le seuil ASF de l'A7 sur le Rubion (26).

Chaque espace située en aval des blocs d'enrochements (ou singularités) constitue une zone d'abri ou de repos pour les individus en migration.

Les espacements entre blocs (espacement longitudinal et latéral) sont généralement voisins et sont déterminés en fonction de la pente du coursier, du débit dans le dispositif et des capacités de franchissement des espèces.

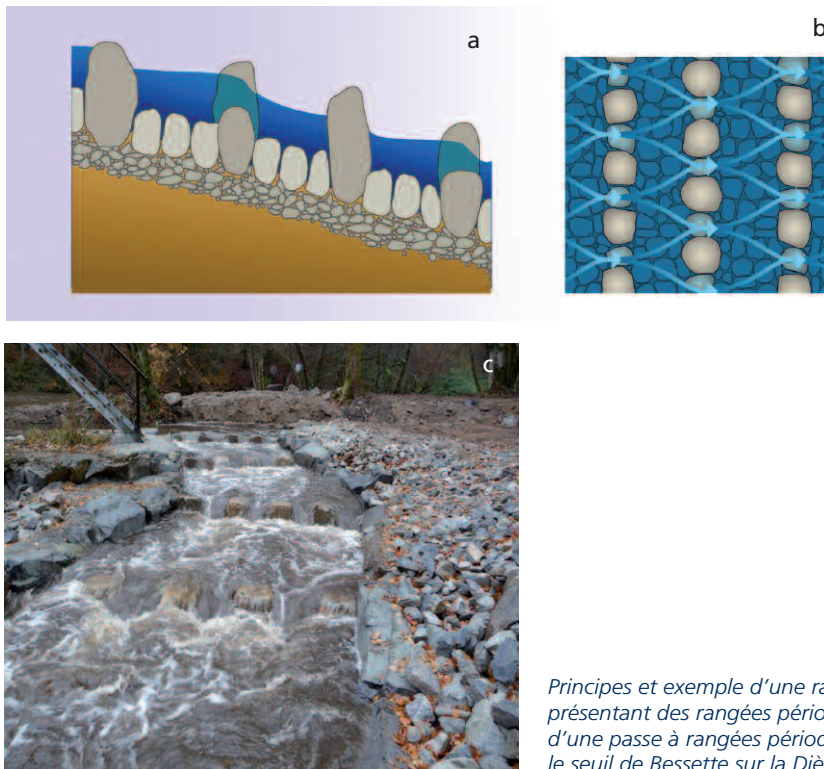
La rugosité de fond au niveau du coursier permet de réduire la vitesse d'écoulement à proximité du fond, ce qui facilite le passage des petites espèces.

Les rampes à rangées périodiques

Un moyen de conserver des hauteurs d'eau suffisantes tout en limitant les débits est de disposer les blocs en rangées à intervalles réguliers. On obtient ainsi des pseudo-bassins où les poissons sont susceptibles de trouver des zones de repos (Figures 114abc).

Ce type de dispositif est très voisin d'une passe à bassins « classique » et les critères de dimensionnement sont relativement comparables.

Figure 114



a, b © d'après Larinier et al, 2006
c © Courret - Onema

Principes et exemple d'une rampe en enrochements présentant des rangées périodiques. (a) (b) Principes d'une passe à rangées périodiques, (c) dispositif sur le seuil de Bessette sur la Diège (19).

Les passes à ralentisseurs

Le principe consiste à disposer, dans un canal rectiligne à pente relativement forte et de section rectangulaire, des déflecteurs sur le fond et/ou les parois destinés à réduire les vitesses moyennes de l'écoulement.

Ces déflecteurs, de formes plus ou moins complexes, donnent naissance à des courants secondaires hélicoïdaux qui assurent une forte dissipation d'énergie au sein de l'écoulement.

Une volée de passe à ralentisseurs ne présente pas de zones de repos et le poisson doit la franchir sans interruption.. Aussi, lorsque la dénivellation est importante, les individus doivent fournir un effort intense pendant

une durée qui peut rapidement dépasser leurs capacités d'endurance : il convient alors de prévoir un ou plusieurs bassins de repos entre les volées.

■ Intérêt et limites des passes à ralentisseurs

L'écoulement dans les passes à ralentisseurs est caractérisé par des vitesses et une aération importantes. Ce type de passe est à réserver aux poissons « bons nageurs » de grande taille comme les salmonidés grands migrants, les lamproies et certaines espèces holobiotiques de tailles suffisantes (truites, barbeaux...).

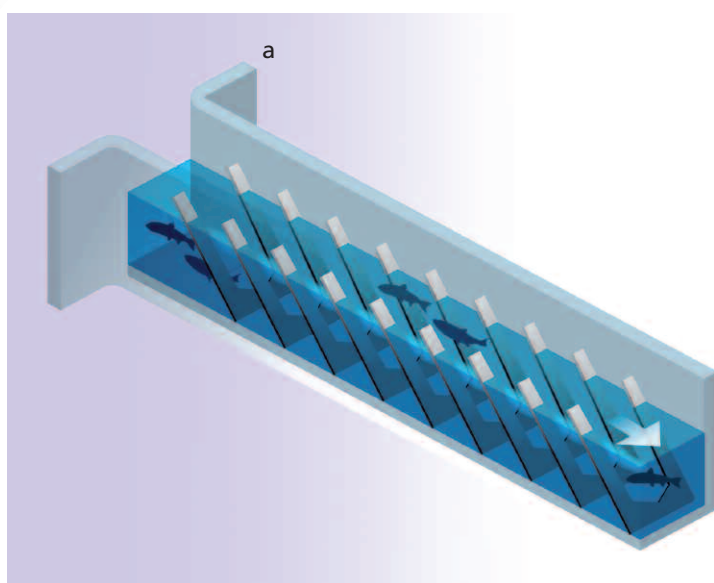
De façon générale, on réserve les passes à ralentisseurs pour les poissons d'une taille supérieure à une trentaine de centimètres. Elles peuvent être utilisées pour des espèces de taille inférieure comme la truite à condition de réduire sensiblement la dimension des ralentisseurs.

■ Les différents types de passes à ralentisseurs

Passes à ralentisseurs plans

C'est un type de passe à ralentisseurs couramment rencontré. Son principal intérêt provient de la simplicité de construction des ralentisseurs, de forme plane, et disposés à 45° par rapport au radier du canal (Figure 115ab). Sa largeur peut varier de 0,60 m à 1,00 m environ et la pente de 12% à 20%.

Figure 115



b © Voegtli - Ecogea

Schéma et exemple de passe à ralentisseurs plans. (a) Schéma, (b) passe à ralentisseurs plans de St Nicolas sur la Sienne.

Passes à ralentisseurs de type Fatou

La passe Fatou (Figure 116ab) est très efficace d'un point de vue hydraulique. Elle présente cependant deux inconvénients majeurs : sa difficulté de construction liée à la forme des ralentisseurs et sa sensibilité au colmatage par les branches et autres corps dérivants. Dans la mesure où son domaine d'utilisation est très voisin de la passe à ralentisseurs plans, on lui préfère généralement cette dernière. Les conditions d'utilisation sont identiques à celles de la passe à ralentisseurs plans.

Figure 116



a, b © Larinier - Pôle Ecohydraulique

Exemples de passes Denil. (a) Passe Denil à Halsou sur la Nive, (b) passe Denil aux Claies de Vire sur la Vire.

Passes à ralentisseurs suractifs de fond

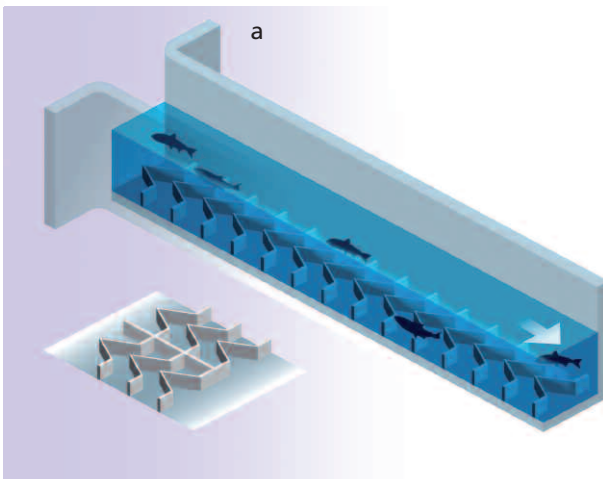
Ce type de passe à ralentisseurs est principalement utilisé en France.

Cette passe ne comporte que des ralentisseurs de fond positionnés sur un plan parallèle à celui du couloir. Les ralentisseurs sont en tôle (épaisseur 8 -10 mm) et leur hauteur varie de 0,08 m à 0,20 m suivant les espèces (Figure 117ab).

Pour les grands salmonidés migrateurs, une pente maximale de 15-16 % est préconisée et les hauteurs de ralentisseurs sont comprises entre 0,10 m et 0,20 m.

Pour les passes spécifiquement conçues pour la truite, les dimensions des ralentisseurs (0,08 m à 0,10 m) et les longueurs des volées sont plus réduites.

Figure 117



b © Mayeras - Ecogea

Schéma et exemple de passe à ralentisseurs de fond suractifs.

(a) Schéma d'une passe à ralentisseurs de fond, (b) passe à ralentisseurs suractifs au barrage de Soustons (40).

Passes à ralentisseurs à chevrons épais ou passe « mixte »

Le principe est sensiblement le même que celui des passes à ralentisseurs suractifs de fond. Les ralentisseurs sont par contre plus épais et généralement en bois afin d'être moins agressifs et permettre le passage d'embarcations (canoë-kayac) (Figure 118ab).

Ils sont par contre moins efficaces hydrauliquement et ne peuvent convenir qu'aux grands salmonidés migrateurs. Ils sont toutefois très sensibles aux variations du niveau amont. Trop sélectif, ce type de dispositif n'est quasiment plus utilisé à l'heure actuelle en France, pour le franchissement piscicole.

Figure 118



*Exemples de passes à chevrons épais.
(a) Passe à chevrons au barrage de Moulin Neuf sur le Trieux, (b) passe à chevrons couplée à une passe à anguilles en Haute-Normandie.*

a © Larinier - Pôle Ecohydraulique
b © Fagard - Onema

Les passes spécifiques à anguilles

■ Principe de l'aménagement

Pour les stades subadultes ou adultes, il est souvent possible de concevoir des dispositifs « traditionnels » adaptés à l'espèce ou d'optimiser les ouvrages existants par ajouts de rugosités de fond, réduction des chutes...

Par contre, pour les plus jeunes stades, au vu de leurs capacités de nage très limitées, des dispositifs spécifiques sont généralement proposés et reposent sur les capacités de reptation des individus.

Les passes spécifiques à civelles et anguillettes sont composées de deux parties :

■ **la rampe de montée**, dont la partie inférieure est immergée dans le plan d'eau aval. Cette rampe est garnie d'un substrat propre à faciliter la progression des poissons. Ce substrat de nature variable suivant les régions ou les pays, est maintenu humide en permanence, soit gravitairement à partir du plan d'eau amont, soit par arrosage à l'aide d'une pompe. Les aménagements réalisés peuvent être de largeurs variables, et présentent généralement une pente longitudinale comprise entre 10 % et 100 % variable en fonction notamment des substrats de reptation mis en place ;

■ **la partie amont**, configurée pour permettre l'accès des migrateurs au plan d'eau amont. Il convient d'assurer dans cette zone une transition telle qu'il n'y ait pas de blocage des migrateurs, soit par discontinuité dans l'alimentation en eau, soit par la présence de zones à vitesse d'écoulement excessif. Le principal problème

rencontré est lié aux fluctuations de niveau du plan d'eau amont. L'abaissement du niveau est susceptible d'entraîner un assèchement du dispositif de franchissement. Au contraire, son augmentation peut rapidement se traduire par une sur-alimentation de la rampe. Ce problème peut être traité de deux façons :

- soit la rampe de montée présente un dévers latéral qui permet d'absorber des variations de niveau de la retenue, en conservant latéralement une zone à faible tirant d'eau et à vitesse d'écoulement modérée pour le passage des individus (Figure 119). Le dévers latéral présente généralement des valeurs comprises entre 20 % et 100 %, avec des valeurs plus faibles et inférieures à 50 % lorsque le substrat de reptation est de type plots,
- soit l'extrémité amont de la rampe de montée est placée à une cote supérieure au niveau maximal de la retenue. La rampe est alors irriguée par pompage et aspersion. Les individus parvenus en haut de la rampe sont entraînés sur un plan incliné et tombent dans le plan d'eau amont, ou dans un vivier de stockage qui permet de les capturer en vue d'un transport ou d'un dénombrement.

La nature, la pente, l'alimentation du substrat (charge) sont des facteurs essentiels déterminant les possibilités de franchissement des anguilles. Les interactions entre ces différents facteurs sont le plus souvent très nettes (Voegtli et Larinier, 2000).

Figure 119

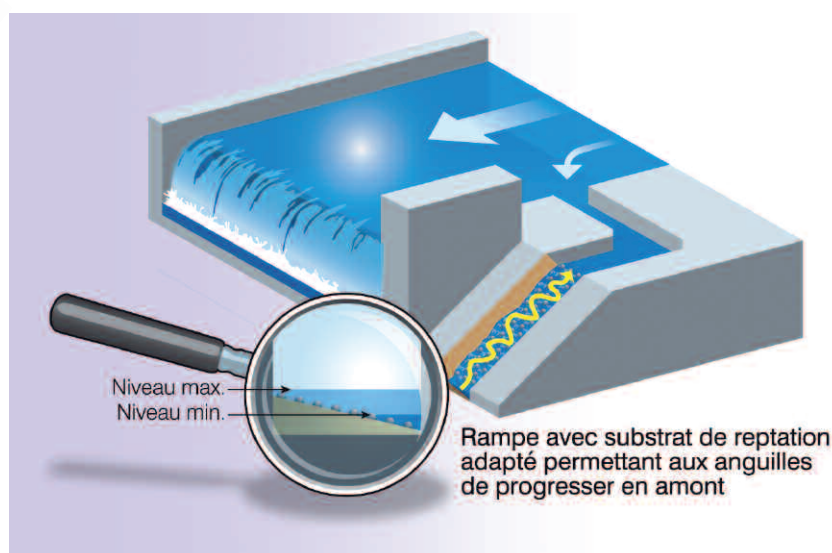


Schéma de principe d'une passe à anguilles alimentée gravitairement.

■ Les principaux substrats de reptation commercialisés en France

Les revêtements utilisés pour les rampes à anguilles sont généralement des substrats de type brosses ou plots. La taille et l'espacement entre chaque singularité dépendent de la taille des individus à faire passer. Un espacement entre appuis de l'ordre de 14 mm est le plus courant et le plus polyvalent.

Les substrats de types brosses (Figure 120a) : ces brosses sont constituées d'un assemblage de filaments en matière synthétique montés en touffes sur un support en PVC. Plusieurs espacements entre touffes peuvent être proposés (de 7 mm à 21 mm) suivant le stade biologique concerné. Ce type de substrat est particulièrement employé en France, notamment pour les très jeunes stades biologiques (civelles).

Les substrats de types plots (Figure 120b) : ce sont des dalles fabriquées en béton ou en polyuréthane présentant un alignement de plots. Leurs caractéristiques techniques (densité de plots et dimensions de plots) sont telles que ces revêtements ne peuvent être retenus que pour les anguillettes et anguilles. La densité d'appuis et la taille des singularités impliquent d'installer ces substrats avec des dévers latéraux moins prononcés que pour les brosses.

Figure 120



a © Voegtlé - Ecogea
b © Lagarrigue - Ecogea

Exemples de passes à anguilles.
(a) Passe à anguilles située sur le courant de Soustons. Rampe équipée d'un substrat de type brosses,
(b) passe à anguilles au barrage de Bergerac sur la Dordogne. Rampe équipée d'un substrat de type plots en polyuréthane.

Les écluses et ascenseurs

■ Les écluses à poissons

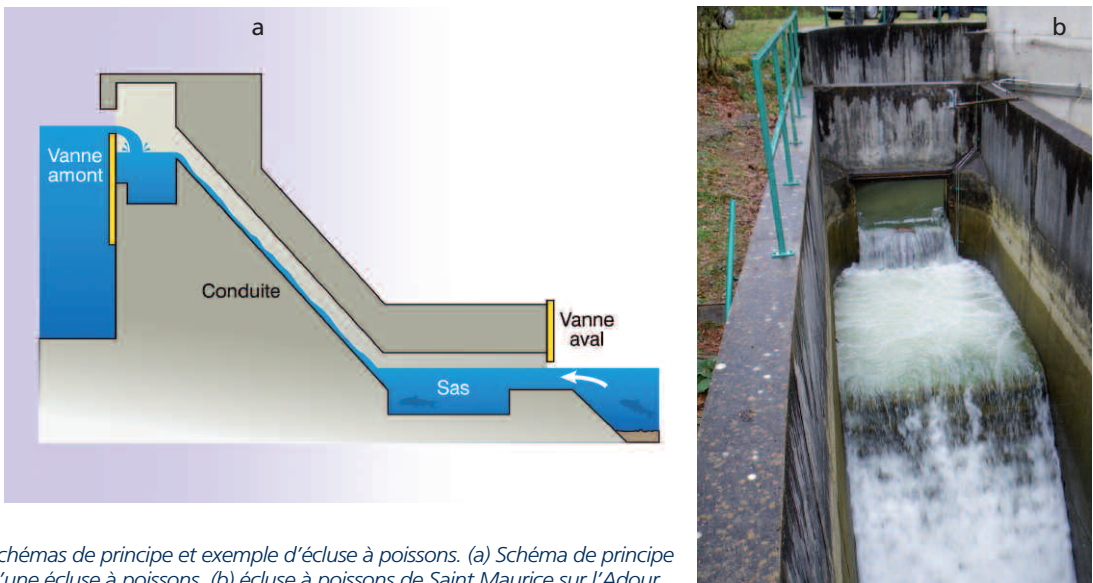
Le principe de fonctionnement d'une écluse à poissons (Figure 121ab) est très voisin de celui d'une écluse de navigation : les poissons sont attirés dans une chambre aval puis éclusés comme un bateau. Ils sont incités à sortir de l'écluse en créant à l'intérieur de celle-ci un courant descendant grâce à l'ouverture d'un by-pass.

Le cycle de fonctionnement peut se résumer ainsi :

- **phase d'attrait.** La vanne aval est ouverte. Le poisson est attiré dans l'écluse par le courant d'alimentation de l'ouvrage ;
- **phase de remplissage et de sortie.** Après une certaine durée de la phase d'attrait, la vanne aval se referme et l'écluse se remplit. Le poisson suit alors la surface libre dans le conduit, remonte et atteint la chambre amont lorsque l'écluse est pleine. Le poisson est incité à passer dans la retenue en maintenant un courant ;
- **phase de vidange.** Au bout d'un certain temps, la vanne amont se ferme. La vidange s'effectue progressivement par le by-pass. Lorsque la vidange est presque totale et que la charge sur la vanne aval devient suffisamment faible, la vanne aval s'ouvre de nouveau.

La durée totale du cycle peut varier de une à plusieurs heures.

Figure 121



b © Chaiseau - Onema

Schémas de principe et exemple d'écluse à poissons. (a) Schéma de principe d'une écluse à poissons, (b) écluse à poissons de Saint Maurice sur l'Adour.

L'efficacité d'un tel dispositif est surtout liée au comportement du poisson qui doit demeurer dans la chambre aval pendant toute la phase d'attrait, suivre le niveau de l'eau lors de la phase de remplissage et sortir de l'écluse avant la vidange.

De nombreuses écluses se sont révélées peu ou pas efficaces. Elles sont de nos jours peu utilisées en France comme à l'étranger.

■ Les ascenseurs à poissons

Dans son principe, un ascenseur à poissons (Figure 122ab) est un système mécanique qui consiste à capturer les migrateurs au pied de l'obstacle dans une cuve contenant une quantité d'eau appropriée à leur nombre puis à élever et déverser celle-ci en amont.

Les migrateurs sont attirés dans un bassin de piégeage (ou de stabulation) par un débit d'attrait. Ils sont piégés dans une "cage" grillagée munie d'un dispositif anti-retour et comprenant, en partie basse, la cuve de transport. A l'aval immédiat de cette cage, est disposée une grille verticale mécanisée qui vient interdire la pénétration des poissons au-dessous de la cuve lorsque celle-ci est en manœuvre.

Le levage de la cuve est assuré par un treuil électrique supporté par une superstructure métallique ou en béton. Le transfert à l'amont s'effectue par basculement de la cuve ou par vidange à l'aide d'une vannette.

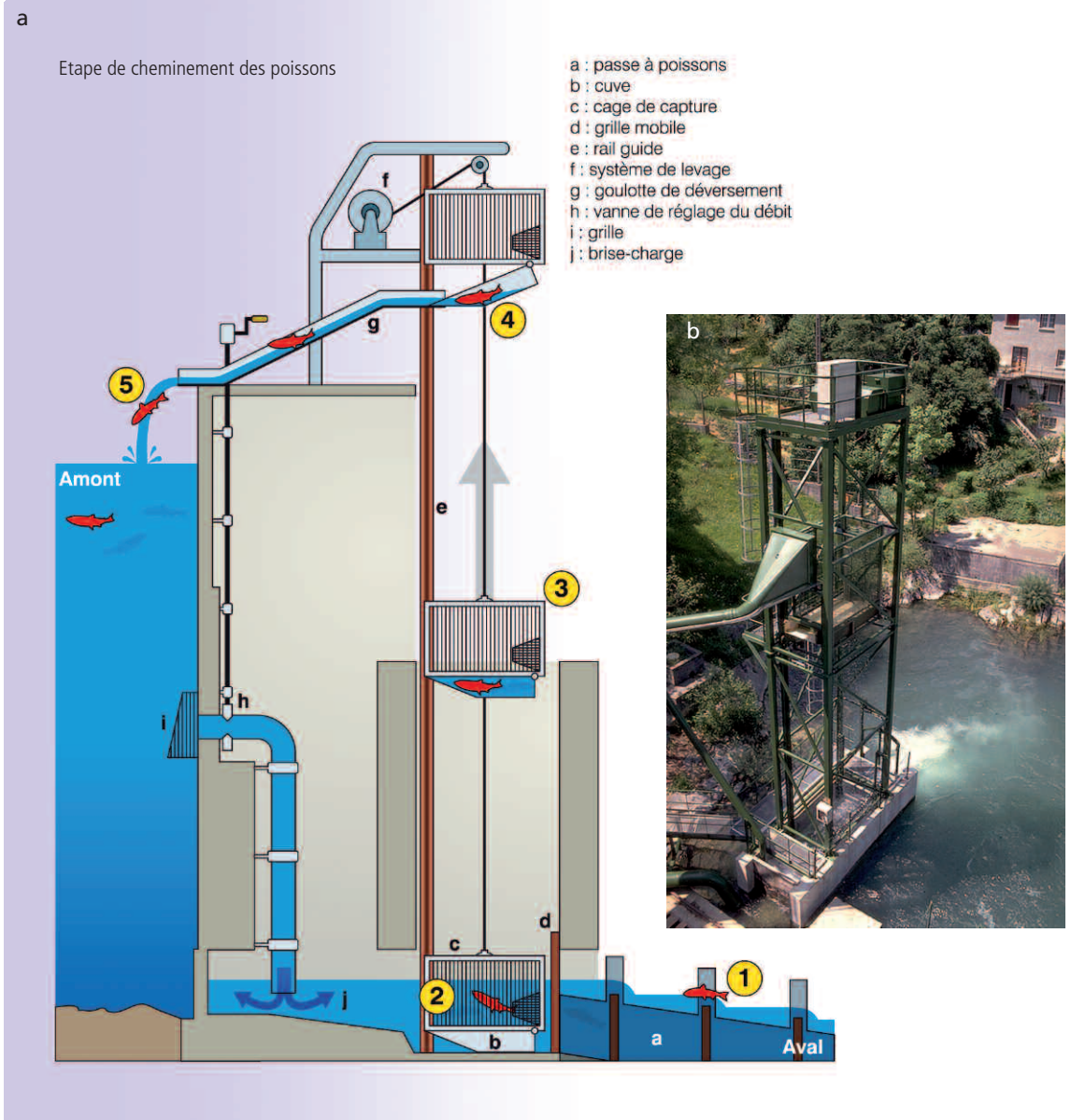
Le cycle de fonctionnement de ces types d'ascenseur est le suivant :

- **phase de piégeage.** La cuve est en position basse, la grille de séparation entre la superstructure de l'ascenseur et la cage de capture est ouverte. Les poissons, attirés par le courant d'eau, remontent dans la cage où ils sont piégés par le dispositif anti-retour ;
- **phase de remontée de la cuve et déversement.** La grille verticale de séparation s'abaisse et la cuve est remontée et puis déversée à l'amont ;
- **phase de descente de la cuve.** Après déversement, la cuve redescend en position de capture. La grille verticale de séparation est ensuite réouverte.

Les principaux avantages des ascenseurs à poissons par rapport aux autres types de passes résident dans leur coût de construction, peu dépendant de la hauteur de la chute à franchir, dans leur faible encombrement, et dans leur moindre sensibilité aux variations du plan d'eau amont.

Les principaux inconvénients sont liés aux contraintes d'exploitation, aux coûts de fonctionnement plus élevés et à une disponibilité souvent moins grande que celle des passes « statiques » (probabilités de pannes du dispositif). Par ailleurs, l'efficacité des ascenseurs pour les espèces de petite taille est en général partielle du fait de l'impossibilité à utiliser, pour des raisons d'exploitation, des grilles suffisamment fines.

Au vu des avantages et contraintes de ce type d'ouvrages, ils sont ainsi généralement installés dès lors que la chute à rattraper s'approche ou dépasse la dizaine de mètres. Pour des chutes plus faibles, il est souvent préférable d'installer des dispositifs plus classiques.



b © Voegtlé - Ecogea

Schémas de principe et exemple d'ascenseur à poissons. (a) Schéma de principe d'un ascenseur à cuve intégrée, (b) ascenseur de Castet sur le gave d'Ossau.

Les ouvrages à marées

Dans la majorité des cas et notamment lorsque les ouvrages estuariens sont construits pour éviter ou limiter l'entrée d'eau vers l'amont, les ouvrages sont très problématiques pour le franchissement des espèces piscicoles qui profitent des courants lors du flot pour progresser vers l'amont.

Lorsque les ouvrages estuariens jouent le rôle inverse, c'est-à-dire lorsqu'ils sont destinés à stocker, durant la marée basse, l'eau apportée à marée haute, ces ouvrages sont généralement peu problématiques, les migrations anadromes se faisant le plus souvent durant le flot.

Pour faciliter le passage des individus en amont, il existe deux grands principes d'aménagement des ouvrages (hors gestion automatique) :

- faire rentrer de l'eau en amont avec trois possibilités, c'est-à-dire en maintenant un ou plusieurs organes mobiles ouverts ou entrouverts, ou bien en aménageant un ou plusieurs orifices dans les structures, ou alors en retardant la fermeture des organes mobiles ;
- aménager comme sur les autres types d'ouvrage, un dispositif de franchissement piscicole.

■ Principes visant à faire pénétrer de l'eau salée ou saumâtre en amont

Maintien d'un ou plusieurs organes mobiles ouverts ou entrouverts

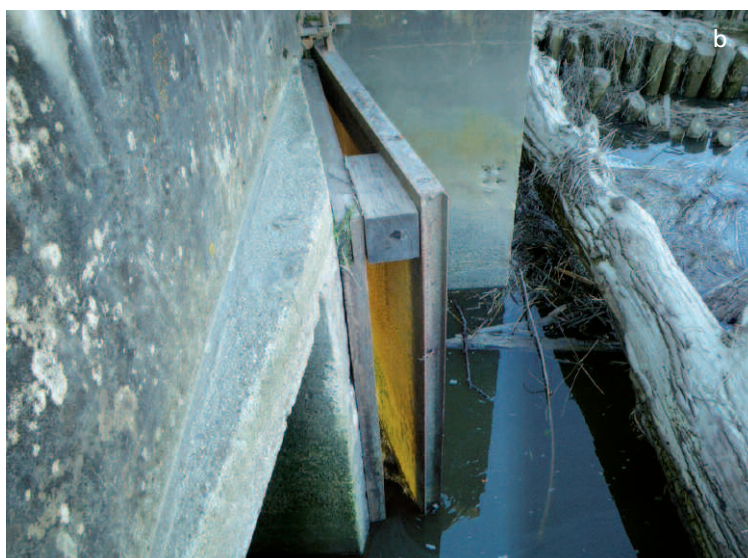
Cette solution consiste à maintenir un ou plusieurs des organes mobiles (vannes, portes, clapets) ouverts ou entrouverts lors du flot (Figure 123ab). Le volume d'eau entrant est plus ou moins important selon la marée (coefficient) et le degré d'ouverture.

Cette solution simple et peu coûteuse permet généralement, en particulier dans le cas de portes à flots, de faire rentrer de l'eau en permanence sur la totalité ou quasi-totalité de la durée du flot, et sur toute la colonne d'eau.

Figure 123



a © Chanseau - Onema
b © Voegtli - Ecogea



Exemples d'organes mobiles laissés entre-ouverts ou bloqués pour rétablir le franchissement. (a) Exemple de portes bloquées sur l'ouvrage de Saubusse (Adour), (b) porte à flots du marais d'Arcins, laissée entrouverte par la mise d'une cale.

Les systèmes employés pour maintenir les organes ouverts sont généralement permanents et difficilement amovibles si nécessaire (ce qui peut être problématique lors de crues couplées à de forts coefficients de marée par exemple).

Les ouvertures, positionnées sur toute la hauteur, font rentrer théoriquement plus d'eau chargée en matières en suspension (MES) et en sel, ce qui peut être problématique pour le milieu amont dans certains cas de figure.

De plus, dans le cas où les volumes d'eau acceptables par le territoire amont sont limités, ce qui est souvent le cas, cela réduit les possibilités d'entrée d'eau dans les moments proches des étals de pleine mer, considérés comme des périodes stratégiques pour les civelles tout au moins (Lafaille *et al.*, 2007).

Enfin, et avant la mise en place de systèmes de cales notamment, il convient de vérifier que l'organe mobile (clapet ou porte) et la structure porteuse résisteront aux poussées hydrauliques, qui peuvent être conséquentes (risque non négligeable de déformation des organes ou de l'ouvrage).

Aménagement d'une ou plusieurs vantelles (orifices) dans la structure

Ce principe consiste à aménager un (ou plusieurs) orifice(s) dans l'organe mobile (porte à flots, clapet, vanne levante) ou dans l'ouvrage en lui-même.

Ces orifices (Figure 124ab) sont généralement couplés à un système de vannette levante permettant de régler la section d'ouverture de l'orifice. Suivant les contraintes amont, le vannage permet de moduler facilement le degré d'ouverture en fonction de la saison (contraintes amont) et des coefficients de marées.

Figure 124



a © Chanseau - Onema
b © Voegtli - Ecogea



Exemples de vantelles installées pour assurer le franchissement. (a) (b) Vantelles situées en partie basse de portes à flots pouvant assurer le transit de poissons lorsqu'elles sont ouvertes (Jalles en Gironde).

Suivant la section d'ouverture et le calage altimétrique de l'orifice, un débit plus ou moins conséquent pénètre en amont.

Plus le calage altimétrique de l'orifice sera bas, plus le volume d'eau pénétrant en amont sera important et plus l'entrée d'eau sera précoce au moment du flot. Par contre, un calage bas est susceptible de faire rentrer plus de matières en suspension en amont, ce qui peut être pénalisant dans certains cas de figures.

Les poissons étant obligés de passer par un endroit assez réduit et localisé, il convient de prendre en compte les risques de braconnage et d'envisager le cas échéant des systèmes rustiques permettant de les réduire.

Retarder la fermeture des organes mobiles

Des systèmes visant à retarder la fermeture des organes mobiles (flotteurs, contre poids, systèmes de ressorts...) sont parfois mis en place sur certains sites en France ou à l'étranger (Figure 125abc, *Environment Agency*, 2011). Ces systèmes visent à assurer le passage d'eau vers l'amont à un certain moment du flot.

Les systèmes sont plus ou moins efficaces suivant le volume d'eau pénétrant en amont et le moment à partir duquel l'organe se ferme définitivement. Leur efficacité peut être fortement réduite en particulier lorsque le dispositif se ferme (ou réduit fortement les entrées d'eau) au moment où le maximum de poissons se concentrent au pied de l'ouvrage, c'est-à-dire le plus souvent dans les quelques heures précédant l'étal de pleine mer.

Figure 125



a, b, c © Williams - UK
Environment Agency (2011)

■ Aménagement de dispositifs de franchissement « classiques »

Sur certains ouvrages estuariens, notamment lorsqu'il n'est pas possible de gérer les ouvrages ou d'aménager des dispositifs permettant de faire entrer de l'eau en amont, des dispositifs de franchissement plus « classiques » peuvent être installés (passes à bassins, passes à anguilles...) (Figure 126abd).

Figure 126



a, b © Voegtlié - Ecogea
c, d © IAV

Exemples de passes estuariennes. (a) et (b) Passe à poissons à l'intérieur de la buse estuarienne de la Durdent, (c) et (d) passe piège à anguilles au barrage d'Arzal sur la Vilaine.



Pré-diagnostic des différents dispositifs de franchissement

Méthodologie employée dans le cadre du protocole ICE

■ Objectif : un diagnostic préalable avant expertises du fonctionnement hydraulique et de son attractivité

Le principe général des dispositifs de franchissement consiste à attirer les migrateurs et à les inciter (voir les obliger dans le cas notamment des ascenseurs) à transiter dans l'ouvrage.

Pour qu'un dispositif de franchissement puisse être considéré comme efficace, le poisson doit en trouver l'entrée rapidement et pouvoir le franchir sans difficulté, sans retard, stress ou blessures préjudiciables à sa migration vers l'amont. Ainsi, **le dispositif de franchissement doit être attractif et fonctionnel.**

L'attractivité d'un dispositif de franchissement est liée à son implantation au niveau de l'obstacle, en particulier à la situation de son (ou ses entrées), à son débit d'alimentation, ainsi qu'à la géométrie du lit et aux conditions hydrauliques à proximité immédiate. Les jets en sortie de dispositif ne doivent pas être masqués ni par des écoulements provenant des turbines, des ouvrages évacuateurs, ou du débit d'attrait de l'ouvrage, ni par des zones de recirculation.

La fonctionnalité d'une passe (adéquation des conditions hydrauliques dans l'ouvrage avec le comportement et les capacités de nage des espèces-cibles) est liée aux conditions hydrauliques internes qui dépendent des conditions géométriques (type de passe, dimensions, pente...) mais également des conditions hydrologiques en périodes de migration, voire de la gestion des organes mobiles de l'aménagement. La variabilité des conditions hydrologiques, comme la gestion de vannes, induisent le plus souvent des fluctuations des niveaux d'eau à l'amont et à l'aval de l'obstacle et donc une certaine variabilité des conditions hydrauliques dans la passe.

S'il est globalement possible d'apprécier sommairement l'adéquation des caractéristiques physiques générales d'un dispositif de franchissement (du type de passe et de sa géométrie) en fonction des espèces ciblées, **il est par contre impossible de définir rapidement et de manière pertinente des critères simples (but du protocole ICE) permettant de se prononcer sur l'attractivité du dispositif et sur son adaptabilité aux variations des conditions hydrologiques.**

Cela nécessite en effet, un bon niveau d'expertise notamment dans le domaine du dimensionnement hydraulique de dispositifs et du comportement des poissons. En préalable, une bonne connaissance de l'hydrologie du cours d'eau, de la répartition des débits au niveau du site étudié en fonction de l'hydrologie, et des niveaux d'eau amont-aval ainsi que de leur variation en période de migration des espèces-cibles sera nécessaire.

Aussi, dans le cadre du protocole ICE, on s'attachera dans un premier temps à s'assurer de l'adéquation du type et des caractéristiques du dispositif de franchissement aux espèces-cibles.

Attention. *In fine*, les pré-diagnostic décrits ci-après en fonction du type de passes à poissons sont des analyses préalables à une expertise complète des ouvrages de franchissement piscicole.

Dans des contextes de surveillance de l'état écologique des milieux aquatiques, les pré-diagnostic ont pour objectif d'identifier rapidement, par quelques critères simples et facilement mesurables, les dispositifs manifestement mal ou non adaptés aux espèces ciblées. Dans une démarche de restauration de la continuité écologique et plus particulièrement dans le cadre de l'évaluation des obstacles soumis à une obligation réglementaire, il sera nécessaire d'engager dans un deuxième temps un diagnostic complet, tenant compte des autres critères d'efficacité (attractivité, autres éléments hydrauliques de fonctionnement à l'échelle du dispositif et à l'échelle de l'ensemble de l'obstacle...), afin de prendre en compte l'ensemble des paramètres nécessaires à l'évaluation, de préciser les causes de dysfonctionnement et de définir le besoin réel d'intervention.

■ Méthodologie du pré-diagnostic

On donnera, pour les principaux paramètres de dimensionnement, pour chaque groupe d'espèces et pour chaque type de dispositifs de franchissement adapté à ce groupe, selon les paramètres dimensionnants :

- des valeurs minimales, qui sont liées à la morphologie et la taille des poissons (dimensions minimales des bassins et des fentes/échancrures, profondeurs d'eau minimales dans les dispositifs ou encore charges minimales dans les fentes ou les échancrures) ;
- des valeurs maximales ou des plages de valeurs recommandées, liées aux capacités de nage ou de saut de l'espèce ou du groupe considéré (vitesses, chutes inter-bassins...).

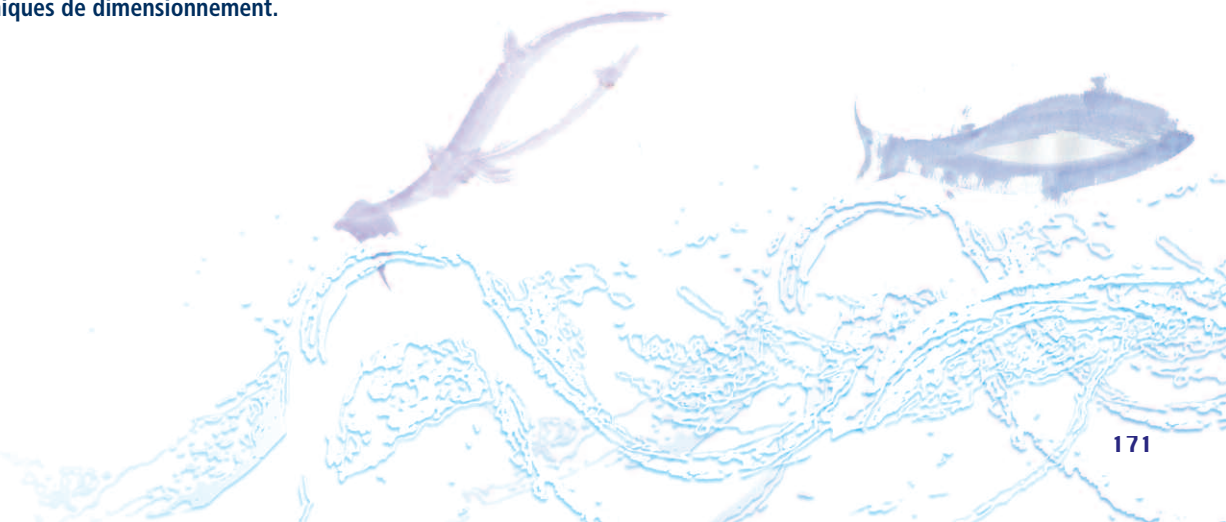
Certains des critères proposés pour les dispositifs de franchissement ne sembleront pas en cohérence avec les valeurs données précédemment pour apprécier le degré de franchissabilité des obstacles.

Ceci est particulièrement notable pour les chutes inter-bassins recommandées dans les passes qui ne correspondent pas aux limites des classes 1 et 0,66 du protocole ICE.

Ces différences de valeurs ou de plage de valeurs intègrent en effet d'autres contraintes que celles liées strictement au groupe d'espèces considéré, en particulier certaines contraintes liées :

- aux conditions hydrodynamiques dans les dispositifs qui constituent des milieux confinés et où les débits et les chutes sont limités et fonction du volume du bassin ;
- à la construction ou à l'entretien du dispositif ;
- au fait que, pour les espèces les moins sportives, les conditions hydrauliques dans une passe sont contrôlées beaucoup plus finement qu'au niveau d'un seuil, en particulier en disposant des rugosités sur le fond du dispositif, de taille et d'organisation prédéfinies, dont peuvent bénéficier les petites espèces benthiques.

D'autres critères dimensionnels que ceux analysés dans le cadre du protocole ICE peuvent également être importants suivant les types de dispositifs (dimensions des déflecteurs, largeur des bassins, dimensions des orifices, taille des ralentisseurs et longueur de volées...). Ils ne seront pas analysés dans le cadre de ce pré-diagnostic et devront être vérifiés lors de l'expertise finale, en se référant notamment aux guides techniques de dimensionnement.



Les passes à bassins

Les passes à bassins peuvent être adaptées à toutes les espèces si les chutes entre bassins, et en sortie de passe, les types d'écoulement et les volumes de bassins (largeur, longueur et tirant d'eau) sont compatibles avec le comportement et les capacités de franchissement de tous les individus.

■ *Passé à jets de surface : passe à fente(s) verticale(s), à échancrures latérales profondes ou à seuils triangulaires*

Dans le cadre de ce pré-diagnostic, les points suivants seront successivement analysés.

1. Vérification du type d'écoulement

On cherchera ici à vérifier que la passe à bassins est bien un dispositif à jet de surface.

Si les écoulements au niveau des échancrures ou fentes sont des écoulements à jet de surface ($H \geq 2.DH$ ou $DH \leq 0,5.H$), alors on procédera à l'analyse des principales dimensions fournies dans le tableau tableau 24, en commençant par l'étape 2.

Par contre, si les écoulements sont plongeants ($H < 2.DH$), on peut d'ores et déjà signaler que le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement de ce type de dispositif : l'ouvrage est mal ou non adapté. Pour les espèces sauteuses, on pourra tout de même analyser les principales dimensions de l'ouvrage en se référant au pré-diagnostic de passe à jets plongeants (voir ci-après volet spécifique aux passes à jets plongeants)

2. Analyse des chutes

Si les chutes entre bassins ou en sortie de passe DH sont supérieures aux valeurs fournies (chute maximale) dans le Tableau 24, alors le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 3.

3. Analyse de la largeur des sections de passage (échancrures, fentes)

Si la largeur des échancrures ou fente est inférieure aux valeurs minimales recommandées fournies dans le Tableau 24, le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 4.

4. Analyse de la profondeur des bassins

Si la profondeur des bassins est inférieure aux valeurs minimales recommandées fournies dans le Tableau 24 le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 5.

5. Analyse de la longueur des bassins

Si la longueur des bassins est inférieure aux valeurs minimales recommandées fournies dans le Tableau 24, le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, la passe peut être considérée comme adaptée **sous réserve de l'expertise des conditions hydrauliques dans l'ouvrage et de son attractivité.**

Groupe ICE	Espèces	Chute maximale (m) *	Chute préconisée (m)	Largeur minimale de fente ou échancrure latérale (m) *	Profondeur minimale de bassin (m) *	Longueur minimale de bassins (m) *
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	0,35	0,30	0,30	1,00	2,50
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0,35	0,30	0,20	1,00	1,75
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0,30	0,25	0,40	1,00	3,50
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)			0,15		
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)					
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,35	0,30	0,20	1,00	1,75
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0,30	0,25	0,15	0,75	1,25
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	0,30	0,25	0,30	0,75	2,50
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,30	0,25	0,20	0,75	1,75
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>) Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	0,30	0,25	0,25	0,75	2,00
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)			0,15		
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	0,25	0,20	0,30	0,75	2,50
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>) Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)					
8c	Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>) Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>) Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>) Perche (<i>Perca fluviatilis</i>) Tanche (<i>Tinca tinca</i>)					
8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors Idus</i>)					
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette spirilin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	0,25	0,20	0,25	0,75	2,00
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>) Chabots (<i>Cottus sp</i>) Goujons (<i>Gobio sp</i>) Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>) Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>) Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>) Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)	0,20	0,15	0,15	0,50	1,25
10	Able de Heckel (<i>Leucaspius delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnurus</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	0,20	0,15	0,15	0,50	1,25
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,25	0,20	0,15	0,50	1,25
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-

(*) Les valeurs fournies sont des valeurs recommandées. Des contraintes spécifiques (débit, emprise disponible...) peuvent conduire à retenir des valeurs légèrement différentes. L'importance des écarts entre valeurs guide et valeurs mesurées souligne le caractère inadapté de la passe.

■ Passe à jets plongeants : passe à échancrures rectangulaires, prébarrages ou à seuils triangulaires dénoyés

Dans le cadre de ce pré-diagnostic, les points suivants seront successivement analysés.

1. Vérification du type d'écoulement

On cherchera ici à bien vérifier que la passe à bassins est bien un dispositif à jet plongeant.

Si les écoulements au niveau des échancrures sont des écoulements à jet de surface ($H \geq 2.DH$ ou $DH \leq 0,5.H$), alors on analysera les principales dimensions fournies dans le Tableau 24 (voir volet spécifique aux passes à jets de surface).

Par contre si les écoulements sont bien à jets plongeants ($H < 2.DH$), on peut d'ores et déjà signaler que le dispositif ne sera pas adapté aux espèces non sauteuses et aller en étape 2.

2. Analyse des chutes

Si les chutes entre bassins ou en sortie de passe DH sont supérieures aux valeurs fournies (chute maximale) dans le Tableau 25, alors le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 3.

3. Analyse de la profondeur des bassins

Si la profondeur des bassins est inférieure aux valeurs minimales recommandées fournies dans le Tableau 25, ou si la profondeur des bassins est inférieure à 2 fois la chute entre bassins, le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 4.

4. Analyse de la charge sur échancrures

Si la charge sur les échancrures est inférieure aux valeurs minimales recommandées fournies dans le Tableau 25, le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 5.

5. Analyse de la longueur des bassins

Si la longueur des bassins est inférieure aux valeurs minimales recommandées fournies dans le Tableau 25, le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, la passe peut être considérée comme adaptée **sous réserve de l'expertise des conditions hydrauliques dans l'ouvrage et de son attractivité.**

Groupe ICE	Espèces	Chute maximale (m) *	Chute préconisée (m)	Profondeur minimale de bassin (m) *	Charge minimale sur l'échancrure (m) *	Longueur minimale de bassins (m) *
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	0,75	0,30	1,00	0,30	2,00
2	Mulets (<i>Chelon labrosus, Liza ramada</i>)	0,60	0,30	0,75	0,20	1,25
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	-	-	-	-	-
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)					
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)					
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,40	0,30	0,75	0,20	1,25
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0,30	0,25	0,75		1,00
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>) Brochet (<i>Esox lucius</i>)	-	-	-	-	-
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,30	0,25	0,75	0,20	1,00
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>) Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>) Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)	-	-	-	-	-
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)					
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	-	-	-	-	-
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>) Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)					
	8c						Brème bordelière (Blicca bjoerkna) Ide melanote (Leuciscus idus) Lotte de rivière (Lota lota) Perche (Perca fluviatilis) Tanche (Tinca tinca)
8d	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors Idus</i>)					
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) Ablette spirilin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>) Blageon (<i>Telestes souffia</i>) Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>) Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>) Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	-	-	-	-	-
	9b						Apron (Zingel asper) Chabots (Cottus sp) Goujons (Gobio sp) Grémille (Gymnocephalus cernuus) Lamproie de Planer (Lampetra planeri) Loche franche (Barbatula barbatula) Loche de rivière (Cobitis taenia)
10	Able de Heckel (<i>Leucaspius delineatus</i>) Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>) Epinoche (<i>Gasterosteus gymnurus</i>) Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>) Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)	-	-	-	-	-
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-	-

(*) Les valeurs fournies sont des valeurs recommandées. Des contraintes spécifiques (débit, emprise disponible...) peuvent conduire à retenir des valeurs légèrement différentes. L'importance des écarts entre valeurs guide et valeurs mesurées souligne le caractère inadaptable de la passe.

Les passes dites « rampes en enrochements »

■ Cas des passes à rangées périodiques

Dans le cadre de ce pré-diagnostic, les points suivants seront successivement analysés.

1. Vérification du type d'écoulement

On cherchera ici à vérifier que la passe présente bien des jets de surface au niveau des rangées périodiques de singularités (enrochements, blocs béton, palplanches isolés...).

Si les écoulements au niveau des rangées sont des écoulements à jet de surface ($H \geq 2.DH$ ou $DH \leq 0,5.H$), alors on analysera les principales dimensions fournies dans le Tableau 26. Aller en étape 2.

Si $0,5H \leq DH \leq H$, alors les écoulements sont quasi-plongeants et on peut considérer que le dispositif est mal adapté.

Si les écoulements sont plongeants ($DH > H$), on peut d'ores et déjà signaler que le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement de ce type de dispositif : l'ouvrage est non adapté.

2. Analyse des chutes entre bassins

Si les chutes au niveau des rangées de singularités sont supérieures aux valeurs fournies (chute maximale) dans le Tableau 26, alors le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 3.

3. Analyse de la charge sur les seuils

Si la charge sur les seuils est inférieure aux valeurs minimales recommandées fournies dans le Tableau 26, le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 4.

4. Analyse de la profondeur des bassins

Si la profondeur des bassins est inférieure aux valeurs minimales recommandées fournies dans le Tableau 26, le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, la passe peut être considérée comme adaptée sous réserve de l'expertise des conditions hydrauliques dans l'ouvrage et de son attractivité.

Analyse spécifique pour l'anguille

Pour l'analyse spécifique sur l'anguille, et dans le cas où une voie de reptation existe sur la passe (cas notamment de passe présentant un dévers latéral adapté), un pré-diagnostic pourra alors être réalisé selon la méthodologie développée dans la partie spécifique du Chapitre C concernant cette espèce.

Dans le cas où, la passe n'est pas jugée comme une barrière franchissable à impact limité par reptation (classe $\neq 1$), alors le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Dans le cas contraire (classe ICE = 1 par reptation), la passe peut être considérée comme adaptée sous réserve de l'expertise finale de l'ouvrage (conditions hydrauliques, attractivité, existence d'une voie de reptation similaire quelles que soient les conditions hydrologiques...).

Tableau 26

Valeurs guide pour le pré-diagnostic des « rampes en enrochements » à rangées périodiques.

Groupe ICE	Espèces	Chute maximale (m) *	Chute préconisée (m)	Charge minimale sur les seuils (m) *	Profondeur minimale de bassin (m) *
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	0,30	0,25	0,30	0,50
	Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)				
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0,30	0,25	0,20	0,50
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0,25	0,20	0,40	0,40
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)				
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)			0,15	
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,30	0,25	0,20	0,50
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0,25	0,20		0,40
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>)	0,25	0,20	0,20	0,40
	Brochet (<i>Esox lucius</i>)				
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,25	0,20	0,20	0,40
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)	0,25	0,20	0,20	0,40
	Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>)				
	Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)				
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)			0,15	
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	0,20	0,15	0,20	0,30
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>)				
	Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)				
8c	Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>)				
	Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>)				
	Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>)				
8d	Perche (<i>Perca fluviatilis</i>)				
	Tanche (<i>Tinca tinca</i>)				
9a	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors Idus</i>)	0,20	0,15	0,20	0,30
	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>)				
	Ablette spirilin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>)				
	Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>)				
	Blageon (<i>Telestes souffia</i>)				
	Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>)				
	Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>)				
	Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>)				
Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)					
Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)					
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>)	0,15	0,10	0,20	0,20
	Chabots (<i>Cottus sp</i>)				
	Goujons (<i>Gobio sp</i>)				
	Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>)				
	Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>)				
	Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>)				
Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)					
10	Able de Heckel (<i>Leucaspius delineatus</i>)	0,15	0,10	0,20	0,20
	Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>)				
	Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>)				
	Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>)				
	Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)				
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,20	0,15	0,05	0,20
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-	-	-

(*) Les valeurs fournies sont des valeurs recommandées. Des contraintes spécifiques (débit, emprise disponible...) peuvent conduire à retenir des valeurs légèrement différentes. L'importance des écarts entre valeurs guide et valeurs mesurées souligne le caractère inadapté de la passe.

■ Cas des rampes en enrochements à singularités régulièrement réparties

Dans le cadre de ce pré-diagnostic, les points suivants seront successivement analysés.

1. Analyse du tirant d'eau minimal

Si le tirant d'eau est inférieur aux tirants d'eau minimaux recommandés fournis dans le Tableau 27, alors le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 2.

2. Analyse des vitesses dans les jets

On recherchera la vitesse maximale dans les jets.

Si la vitesse maximale dans les jets est supérieure aux valeurs maximales fournies dans le Tableau 27, alors le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, la passe est considérée comme adaptée **sous réserve de l'expertise des conditions hydrauliques dans l'ouvrage et de son attractivité.**

Analyse spécifique pour l'anguille

Pour l'analyse spécifique sur l'anguille, et dans le cas où une voie de reptation existe sur la passe (cas notamment de passe présentant un dévers latéral), un pré-diagnostic pourra alors être réalisé également selon la méthodologie développée dans la partie spécifique du chapitre C concernant cette espèce.

Dans le cas où, par reptation, la passe n'est pas jugée comme une barrière franchissable à impact limité (classe $\neq 1$), le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Dans le cas contraire (classe ICE = 1 par reptation), la passe peut être considérée comme adaptée **sous réserve de l'expertise finale de l'ouvrage** (conditions hydrauliques, attractivité, existence d'une voie de reptation similaire quelles que soient les conditions hydrologiques...).

Tableau 27

Valeurs guide pour le pré-diagnostic de rampes en enrochements présentant des singularités régulièrement réparties.

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimum (m) *	Vitesse d'écoulement maximale (m/s) *
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	0,40	2,50
	Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)		
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0,30	2,50
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>)	0,40	2,00
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>)		
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)		
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,30	2,00
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	0,20	
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>)	0,30	2,00
	Brochet (<i>Esox lucius</i>)		
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,30	2,00
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)	0,30	2,00
	Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>)		
	Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)		
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	0,15	
8a	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	0,30	1,50
8b	Brème commune (<i>Abramis brama</i>)		
	Sandre (<i>Sander lucioperca</i>)		
8c	Brème bordelière (<i>Blicca bjoerkna</i>)		
	Ide melanote (<i>Leuciscus idus</i>)		
	Lotte de rivière (<i>Lota lota</i>)		
	Perche (<i>Perca fluviatilis</i>)		
8d	Tanche (<i>Tinca tinca</i>)		
9a	Vandoises (<i>Leuciscus sp hors Idus</i>)	0,20	1,50
	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>)		
	Ablette spririlin (<i>Alburnoides bipunctatus</i>)		
	Barbeau méridional (<i>Barbus meridionalis</i>)		
	Blageon (<i>Telestes souffia</i>)		
	Carassin commun (<i>Carassius carassius</i>)		
	Carassin argenté (<i>Carassius gibelio</i>)		
	Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>)		
Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)			
Toxostome (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)			
9b	Apron (<i>Zingel asper</i>)	0,20	1,50
	Chabots (<i>Cottus sp</i>)		
	Goujons (<i>Gobio sp</i>)		
	Grémille (<i>Gymnocephalus cernuus</i>)		
	Lamproie de Planer (<i>Lampetra planeri</i>)		
	Loche franche (<i>Barbatula barbatula</i>)		
Loche de rivière (<i>Cobitis taenia</i>)			
10	Able de Heckel (<i>Leucaspis delineatus</i>)	0,20	1,50
	Bouvière (<i>Rhodeus amarus</i>)		
	Epinoche (<i>Gasterosteus gymnuris</i>)		
	Epinochette (<i>Pungitius laevis</i>)		
	Vairons (<i>Phoxinus sp</i>)		
11a	Anguille européenne [jaune] (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,05	1,50
11b	Anguille européenne [civelle] (<i>Anguilla anguilla</i>)	-	-

(*) Les valeurs fournies sont des valeurs recommandées. Des contraintes spécifiques (débit, emprise disponible...) peuvent conduire à retenir des valeurs légèrement différentes. L'importance des écarts entre valeurs guide et valeurs mesurées souligne le caractère inadapté de la passe.

Les passes à ralentisseurs

Les passes à ralentisseurs ne sont pas adaptées à toutes les espèces et sont réservées aux poissons bons nageurs.

Dans le cadre de ce pré-diagnostic, les points suivants seront successivement analysés.

1. Vérification de l'absence de chute en aval

S'il existe une chute en pied de passe, le dispositif ne respecte pas les critères généraux minimums de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 2.

2. Analyse des espèces concernées

Vérifier que le groupe (et l'espèce) peut emprunter ce genre de passes (c'est-à-dire que l'espèce appartient à un numéro de groupe < 7a). Si oui aller en étape 3.

Les aloses recherchent des veines d'écoulement régulières à filets parallèles et évitent dans la mesure du possible les zones tourbillonnaires à forte turbulence et eaux émulsionnées). Aussi, pour les sous-groupes des aloses (3a et 3b) et dans le cadre de ce pré-diagnostic ICE, les passes à ralentisseurs peuvent être considérées comme des dispositifs non ou mal adaptés.

La lamproie fluviatile (groupe 7b) doit posséder des capacités de franchissement lui permettant de transiter théoriquement sans grandes difficultés par les passes à ralentisseurs. Cependant, en l'état actuel des connaissances, et par mesure de précaution, il est difficile de prendre en compte cette espèce dans ce pré-diagnostic.

Si Non (espèce appartenant à un numéro de groupe ≥ 8), le dispositif n'est pas adapté à cette espèce.

3. Analyse du tirant d'eau

Si le tirant d'eau sur les ralentisseurs est inférieur aux valeurs seuils du Tableau 28, alors le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 4.

4. Analyse des pentes

Si la pente de la passe est supérieure à 16% (ralentisseurs de fond) ou à 20% (ralentisseurs plans), alors le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, une expertise est nécessaire (analyse des conditions hydrauliques dans l'ouvrage en fonction de l'hydrologie en période de migration, analyse des longueurs de volées et dimensions des bassins de repos, attractivité...).

Tableau 28 Valeurs guide pour le pré-diagnostic des passes à ralentisseurs.

Groupe ICE	Espèces	Tirant d'eau minimum sur les ralentisseurs suractifs de fond (m)	Tirant d'eau minimum sur les ralentisseurs plans (m)
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	0,20	0,30
	Truite de mer ou de rivière [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)		
2	Mulets (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	0,15	0,25
3a	Grande alose (<i>Alosa alosa</i>) *	0,20	0,30
3b	Alose feinte (<i>Alosa fallax fallax</i>) *	0,15	0,25
3c	Lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>)	0,10	0,10
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	0,15	0,25
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>) *	0,10	0,20
5	Aspe (<i>Aspius aspius</i>)	0,20	0,30
	Brochet (<i>Esox lucius</i>)		
6	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)	0,15	0,25
7a	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)	0,15	0,25
	Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>)		
	Hotu (<i>Chondrostoma nasus</i>)		
7b	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)	0,10	0,10

Les valeurs fournies sont des valeurs recommandées. Des contraintes spécifiques (débit, emprise disponible...) peuvent conduire à retenir des valeurs légèrement différentes. L'importance des écarts entre valeurs guide et valeurs mesurées souligne le caractère inadapté de la passe.

Les passes spécifiques à anguilles

Dans le cadre de ce pré-diagnostic, les points suivants seront successivement analysés.

1. Vérification de l'absence de chute en aval

S'il existe une chute en pied de passe, alors le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, aller en étape 2.

2. Présence d'une voie continue de reptation

Vérifier sur l'ensemble du dénivelé à franchir, l'existence d'une zone propice à la reptation des anguilles (zone où le substrat est alimenté par un tirant d'eau inférieur à 1 cm pour les anguillettes et 0.5 cm pour les civelles) et aller en étape 3.

Si Non, le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

NB On pourra toutefois tolérer un tirant d'eau maximum de l'ordre de 2 cm pour des faibles pentes longitudinales voisines de 15-20 % ou dans le cas de substrats de type brosses plus tolérants que les substrats de type plots. En cas de présence de civelles, le tirant d'eau devra être toujours inférieur à 5 mm quelle que soit la pente longitudinale.

Ces valeurs guide militent pour la mise en place d'un substrat en dévers latéral y compris pour des passes alimentées par pompage.

3. Analyse de la pente longitudinale

Vérifier que la pente longitudinale de la rampe de reptation est inférieure à la valeur maximale de 100% préconisée si le substrat est de type brosses ou à la valeur de 70% préconisée si le substrat est de type plot. Puis aller en étape 4.

Si Non, le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

NB La valeur fournie de pendage longitudinal en présence de substrats plot est une valeur recommandée. Des contraintes spécifiques (débit, emprise disponible, dévers latéral à faible pente, dénivelé à rattraper...) peuvent conduire à retenir des valeurs légèrement supérieures. L'importance des écarts entre cette valeur guide et la valeur mesurée souligne le caractère inadapté de la passe.

4. Analyse du dévers latéral

Dans le cas où le dispositif présente un dévers latéral (rampe alimentée gravitairement), vérifier que la pente du dévers latéral est inférieure à la valeur maximale de 50% préconisée si le substrat est de type brosses ou à la valeur maximale de 25% préconisée si le substrat est de type plots. Puis aller en étape 5.

Si Non, la pente est trop importante, le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

NB Les valeurs fournies de pendages latéraux sont des valeurs recommandées. Des contraintes spécifiques (débit, emprise disponible, pente longitudinale faible, dénivelé à rattraper...) peuvent conduire à retenir des valeurs légèrement supérieures. L'importance des écarts entre ces valeurs guide et les valeurs mesurées souligne le caractère inadapté de la passe.

5. Nature du substrat

Dans le cas où de très jeunes stades sont susceptibles d'être présents sur le site (civelle en particulier) et que le substrat n'est pas de type brosses (ou similaire), alors le substrat n'est pas adapté au stade biologique et le dispositif ne respecte pas les critères généraux de dimensionnement : l'ouvrage est mal ou non adapté.

Si Non, la passe peut être considérée comme adaptée sous réserve de l'expertise des conditions hydrauliques dans l'ouvrage et de son attractivité.

Les rivières de contournement

Une rivière de contournement consiste à relier les biefs amont et aval par un chenal dans lequel l'énergie est dissipée et les vitesses réduites. Ces propriétés sont engendrées par la rugosité du fond, par celle des parois, ainsi que par une succession de singularités (blocs, épis, seuils) plus ou moins régulièrement réparties. L'objectif est en quelque sorte de reproduire un écoulement proche de celui d'un cours d'eau naturel. La pente de ce type d'ouvrage peut être variable : de 1% à plus de 6%. Elle est fonction des espèces considérées et de l'importance des débits transitant dans l'ouvrage.

Leur mise en place se heurte généralement à la faiblesse de leur pente (se traduisant par des longueurs souvent importantes) et à la difficulté de les adapter aux variations de niveaux d'eau souvent notables sans dispositifs spéciaux (vanne, clapet ou passe à bassin).

On peut globalement distinguer deux types de rivières de contournement :

■ **les dispositifs où la dissipation d'énergie est concentrée au niveau de chutes engendrées par des seuils régulièrement espacés.** Ces seuils créent une succession de bassins d'une longueur telle que toute l'énergie se dissipe avant la chute. Dans ce cas de figure, un prédiagnostic peut être réalisé en analysant les différentes chutes selon les critères prescrits pour les passes à bassins ;

■ **les dispositifs où la dissipation d'énergie est moins localisée et s'effectue plus ou moins régulièrement tout au long de l'ouvrage par des rugosités et des pertes de charges singulières (épis, blocs...).** Pour ce type de rivière de contournement, une expertise des conditions de fonctionnement et des conditions hydrauliques dans l'ouvrage est indispensable.

Figure 127



© Voegtje - Ecogea

(a) Rivière de contournement du lac des graves sur le gave de Pau, (b) rivière de contournement de Biron sur le gave de Pau, (c) rivière de contournement de la Vilette sur l'Eure, (d) rivière de contournement du Hamet sur l'Eure.

Les écluses, ascenseurs et ouvrages à marées

Pour les écluses et ascenseurs, il est difficile de donner des critères simples et facilement mesurables, permettant de faire ressortir les dispositifs d'ores et déjà mal ou non adaptés aux espèces ciblées.

Pour ce type d'ouvrages, une expertise des conditions de fonctionnement et des conditions hydrauliques dans l'ouvrage est obligatoire.

An underwater scene featuring a large shark swimming in the foreground, with several rays swimming in the background. The water is clear and blue, with some light reflections on the surface.

Bibliographie, sigles & abréviations



Bibliographie

- Almeida P.R., Póvoa I., Quintella B.R. (2007). Laboratory protocol to calibrate sea lamprey (*Petromyzon marinus* L.) EMG signal output with swimming. *Hydrobiologia* 582:209-220.
- Baade U. & Fredrich F. (1998). Movement and pattern of activity of the roach in the River Spree, Germany. *Journal of Fish Biology* 52:1165–1174.
- Baglinière J- L. & Elie P. (2000). Les aloses (*Alosa alosa* et *Alosa fallax* spp.) Ecobiologie et variabilités des populations. Edition INRA, 279 pp.
- Baras E. (1992). Etude des stratégies d'occupation du temps et de l'espace chez le barbeau fluviatile, (*Barbus barbus* L.). *Cahier d'Ethologie Appliquée* 12: 125–442.
- Bau F., Gomes P., Baran P., Drouineau H., Larinier M., Alric A., Travade F., De Oliveira E., 2013. Suivi par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Sapso, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2007-2010). Rapport de synthèse. Rapport Onema/EDF – Programme R&D Anguilles/Ouvrage.
- Bau F., Gomes P., Bordes N., Larinier M., Travade F., De Oliveira E.(2008). Suivi par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le Gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2007-2008). Rapport GHAAPPE-EDF R&D.
- Beach M.H. (1984). Fish pass design. Criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Lowestoft, Fish. Res. Tech. Rep. 78, 45p.
- Bell M.C & Delacy A.C. (1972). A compendium on the survival of fish passing through spillways and conduits. *Fish. Eng. Res. Prog., US Army Corps of Eng., North Pacific Div., Portland, Oregon*, 294 p.
- Bell M.C. (1986). Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria: Useful factors in life history of most common species. *US 116 Army Corps of Engineers, Portland, Oregon*. Contract number DACW57-68-C-0086.
- Blaxter JHS & Dixon W., (1959). Observations on the swimming speeds of fish. *J.Cons.Perm.Int.Explor. Mer*, 24(3) : 472-9.
- Booth, R.K., McKinley, R.S., Økland, F., and Sisak, M.M., (1997-. In situ measurement of swimming performance of wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) using radio transmitted electromyogram signals. *Aquatic Living Resources* 10, pp. 213-219.
- Bosc S. & Larinier M., (2000). Définition d'une stratégie de réouverture de la Garonne et de l'Ariège à la dévalaison des salmonidés grands migrants. Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison. Rapport GHAAPPE RA.00.01 / MIGADO G17-00-RT, 53 p.
- Breder M. J., Ruetz C. R., Thompson K.J., Kohler L. (2009). Movements of mottled sculpins (*Cottus bairdii*) in a Michigan stream: how restricted are they? ted are they? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 66: 31–41.
- Briand C. & Boussion D. (1998). Suivi des passes estuariennes de la Vilaine. Rapport d'étude, Institution d'Aménagement de la Vilaine.
- Burgun V. (2005). Eléments de connaissances de l'aspe - *Aspius aspius* (Linné 1758) – du bassin Rhin-Meuse. Rapport CSP- ENGREF. 58p + annexes.
- Carol J., Zamora L., Garcia-Berthou E. (2007). Preliminary telemetry data on the patterns and habitat use of European catfish (*Silurus glanis*) in a reservoir of the River Ebro, Spain. *Ecology of Freshwater Fish* 16:450–456.



- Chanseau M., Laborie P., Galiay E., Barracou D., Larinier M., Travade F. (1998). Expérimentation d'un dispositif de dévalaison pour les smolts de saumon atlantique – Prise d'eau de Bedous (Gave d'Aspe-64). Rapport GHAAPPE RA98.06, 28p + annexes.
- Chanseau M., Larinier M., Travade F. (1999). Efficacité d'un exutoire pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Bedous sur le Gave d'Aspe étudiés par la technique de marquage-recapture et par radiotélémétrie. Bull. Fr. Pêche Piscic., 353/354 : 99-120.
- Chanseau M., Dartiguelongue J., Larinier M. (2000). Analyse des données sur les passages enregistrés aux stations de contrôle des poissons migrateurs de Golfèch et du Bazacle sur la Garonne et de Tuilières sur la Dordogne. Rapport GHAAPPE RA00.12 / MIGADO G14-00-RT, 64 p.
- Chanseau M., Barrière O., Travade F. (2002). Étude de la migration de dévalaison des juvéniles de saumon atlantique au niveau des aménagements hydroélectriques EDF de Castetarbe, Baigts de Béarn et Puyoo sur le Gave de Pau en 2001. Rapport EDF.
- Chanseau M., Larinier M., Courret D., Bordes N. (2012). La dévalaison des migrateurs amphihalins au niveau des petites centrales hydroélectriques. Note de positionnement technique de la délégation interrégionale Sud-Ouest de l'Onema. 49p.
- Clarkin K., Connor A., Furniss M., Gubernick B., Love M., Moynan K., WilsonMusser S. (2005). National Inventory and Assessment Procedure-For Identifying Barriers to Aquatic Organism Passage at Road-Stream Crossings. US Département of Agriculture Forest Service
- Clough S., Beaumont W.C.R. (1998). Use of miniature radio-transmitters to track the movements of dace, *Leuciscus leuciscus* (L.) in the River Frome, Dorset. Hydrobiologia 372, 89-97.
- Clough S.C. & Turnpenny A.W.H. (2001) Swimming speeds in fish: Phase 1. R & D Technical Report W2-026/TR1, Environment Agency, Bristol, 94 pp.
- Clough S.C., Lee-Elliott I.H., Turnpenny A.W.H., Holden S.D.J., Hinks C. (2002) Swimming speeds in fish: Phase 2. R & D Technical Report W2-026/TR3, Environment Agency.
- Coffman J.S. (2005). Evaluation of a predictive model for upstream fish passage through culverts. M.Sc. thesis Biology, James Madison University.
- Colavecchia, M., Katopodis, C., Goosney, R., Scruton, D.A., and McKinley, R.S., 1998. Measurement of burst swimming performance in wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) using digital telemetry. Regulated Rivers: Research and Management 14, pp. 41-51.
- Copp G.H., Britton J.R., Cucherousset J., Garcia-Berthou E., Kirk R., Peeler E., Stakenas S. (2009). Voracious invader or benign feline? A review of the environmental biology of European catfish *Silurus glanis* in its native and introduced ranges. Fish and Fisheries 10:252-282.
- Croze O. & Larinier M. (1999). Etude du comportement de smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*) au niveau de la prise d'eau de l'usine hydroélectrique de Pointis sur la Garonne et estimation de la dévalaison au niveau du barrage de Rodère. Bull. Fr. Pêche Piscic. 353/354, 141-156.
- Croze O., Chanseau M., Larinier M. (1999). Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Camon sur la Garonne. Bull. Fr. Pêche Piscic. 353/354, 121-140.
- Croze O., Breinig T., Pallo S., Larinier M. (2001). Etude de l'efficacité d'exutoires de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*) - Usines hydroélectriques de Guilhot, Las Rives et Las Mijanes (Ariège, 09). Rapport GHAAPPE 01.07.
- Croze O. (2008). Impact des seuils et barrages sur la migration anadrome du saumon atlantique (*Salmo salar* L.) : caractérisation et modélisation des processus de franchissement. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse. 322pp.
- Courret D. & Larinier M. (2008). Guide pour la conception de prises d'eau " ichyocompatibles " pour les petites centrales hydroélectriques. Rapport ADEME – GHAAPPE. 60p +annexes.
- De Boeck G., Tudorache C., Blust R., Viaene P., Geeraerts C., Verbiest H., Belpaire C., De Charleroy D., Buysse D., Coeck J., Van Houdt J., Volckaert P., Cornille I., Tigel Pourtois J., Baret P., Philippart J.C., Ovidio M. (2006). Impact assessment and remediation of anthropogenic interventions on fish populations (Fishguard). Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles. Rapport final, 80 p.

- De Leeuw J.J & Winter E. (2008). Migration of rheophilic fish in the large lowland rivers Meuse and Rhine, the Netherlands. *Fisheries Management and Ecology* 15:409-415.
- Dizier (2011). Révision de la taxonomie ichtyologique en métropole: adaptation des outils de gestion - Rapport d'étape. MNHN - Onema 77p
- Dubost, N. & Vauclin V. (2001). Etude des déplacements et des migrations du Brochet (*Esox lucius* L.) par radiopistage dans l'Ille (1997-2000) Travail commandé par : Association Saumon Rhin. Rapport de recherche, 56 pp.
- Duthie G.G. (1982). The respiratory metabolism of temperature-adapted flatfish at rest and during swimming activity and the use of anaerobic metabolism at moderate swimming speed. *Journal of Experimental Biology*, 97, 359-373.
- DWA (2005). Fish protection technologies and downstream fishways: Dimensioning, design, effectiveness, inspection. DWA German Association for Water, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfälle.V., 226 p.
- Egis Environnement-Hydrosphère (2007-2008). Etude de l'impact des modifications des conditions d'éclaircissement des cours d'eau franchis par des infrastructures de transport sur la circulation piscicole. Rapport pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. Rapports phase 1 et 2.
- Environmental agency (2007). Barriers to Fish Migration Survey: Assessment Criteria and Procedure. Extended field manual
- Environmental agency (2011). Self-regulating tide gate: a new design for habitat creation. Flood and coastal erosion risk management research and development programme : 14p.(https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291577/scho0811buay-e-e.pdf).
- Fahlbusch F.E. (1994). Scour in Rock Riverbeds Downstream of Large Dams. *Hydropower & Dams*, 1(4), 30–32.
- Fredrich F. (2003). Long-term investigations of migratory behaviour of Asp (*Aspius aspius* L.) in the middle part of the Elbe River, Germany. *Journal of Applied Ichthyology* 19:294-302.
- Fredrich F., Ohmann S., Curio B., Kirschbaum F. (2003). Spawning migrations of the chub in the River Spree, Germany. *Journal of Fish Biology* 63:710-723.
- Freyhof J., Kottelat M., Nolte A. (2005). Taxonomic diversity of European Cottus with description of eight new species (*Teleostei: Cottidae*). *Ichthyological Exploration of Freshwater* 16:107–172.
- Frith H.R. & Blake R.W. (1995) The mechanical power output and hydromechanical efficiency of northern pike (*Esox lucius*) fast-starts. *The Journal of experimental Biology* 198:1863–1873.
- Fritz Ö. & Larsson K. (1996). Betydelsen av skoglig kontinuitet för rödlistade lavar. En studie av halländsk bokskog. [The significance of long forest continuity to red-listed lichens. A study of beech forest in the province of Halland, SW Sweden.] *Svensk Botanisk Tidskrift* 90 : 241-262.
- Froese R., Pauly D. Editors. (2012). FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org, version (12/2012).
- Gaudin P. & Pradelle S. (2001). Etude du franchissement d'obstacles par des juvéniles d'Apron du Rhône (*Zingel asper*). (Rapport du Programme LIFE), R.N.F., Univ. Lyon I, Quetigny : 17 p.
- Gautier D. & Hussenot J. (2005). Les mulets des mers d'Europe. Synthèse des connaissances sur les bases biologiques et les techniques d'aquaculture. Edition Ifremer, 115pp.
- Geeraerts, C., Ovidio, M., Verbiest, H., Buysse, D., Coeck, J., Belpaire, C., & Philippart, J.C. (2007). Mobility of individual roach (*Rutilus rutilus*) in three weir fragmented Belgian rivers. *Hydrobiologia*, 582, 143-153.
- Gomes P., Vighetti S., Larinier M. (2005). Etude pour la conception de passes adaptées à l'apron. Projet N°LIFNAT/FR/000083 programme de conservation de l'apron du Rhone (*Zingel asper*) et de ses habitats. 54 pp.
- Gomes P., Larinier M. (2008). Etude sur la mortalité des anguilles suite à leur passage au travers des turbines Kaplan. Etablissement de formules prédictives. Rapport GHAAPPE RA 08.01, 43 p. + annexes.
- Gowan, C., M. K. Young, K. D. Fausch & S. C. Riley, (1994). Restricted movement in resident stream salmonids: a paradigm lost? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic* 51 : 2626–2637.
- Hanski, I. (1999). *Metapopulation Ecology*. Oxford, Oxford University Press, 313 p.
- Harper D.G. & Blake R.W. (1991). Prey capture and the fast-start performance of northern pike *Esox lucius*. *The Journal of experimental Biology* 155:175–192.



- Hendriks A.J., Huijbregts M.A.J., Lenders H.J.R., Matthews J., Van der Velde G. (2011). Differences in sensitivity of native and exotic fish species to changes in river temperature. *Current Zoology*, 57, 852-862.
- Hertel H. (1966). *Structure, Form, Movement*. New York: Reinhold Publishing Corp. 251 pp.
- Hlađík M. & Kubečka J. (2003). Fish migration between a temperate reservoir and its main tributary. *Hydrobiologia* 504, 251–266.
- Holthe E., Lund E., Finstad B., Thorstad, E.B. and McKinley, R.S. (2005). A fish selective obstacle to prevent dispersion of an unwanted fish species, based on leaping capabilities *Fisheries Management and Ecology*. 12 143–7
- Hubert M. & Kirchofer A. (1998). Radio telemetry as a tool to study habitat use of nase (*Chondrostoma nasus* L.) in medium sized rivers. *Hydrobiologia* 371/372:309–319.
- James A. & Joy M. (2008). A preliminary assessment of potential barriers to fish migration in the Manawatu River catchment, North Island, New Zealand. A report prepared for Horizons Regional Council. Foundation of Research, Science & Technology EnviroLink Contract Ref: 37-HZLC45.
- Jellyman D. (2009). A review of radio and acoustic telemetry studies of freshwater fish in New Zealand. *Marine and Freshwater Research* 60(4):321–327.
- Jones D. R., Kiceniuk J. W., Bamford O. S. (1974). Evaluation of the swimming performance of several species of fish from the Mackenzie River. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 31, 1641–1647.
- Jones M.J. & Stuart I.G. (2009). Lateral movement of common carp (*Cyprinus carpio* L.) in a large lowland river and floodplain. *Ecology of Freshwater Fish* 18:72-82.
- Keith P., Persat H., Feunteun E., Allardi J. (2011). *Les poissons d'eau douce de France*. Biotope, Mèze; Museum national d'histoire naturelle, Paris (collection Inventaires et biodiversité), 552 p.
- Kemp P.S., Russon I.J., Waterson B., O'Hanley J., Pess G.R. (2008). *Recommandations for a "Coarse-Resolution Rapid-Assessment" Methodology to Assess Barriers to Fish Migration and Associated Prioritization Tools – Final Report*. Stirling : Scottish Environment Protection Agency, 143 p.
- Kemp P.S. & O'Hanley J. (2010). Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers : a synthesis. *Fisheries Management and Ecology*, 2010, 17, 297-322.
- Knaepkens G., Bruyndoncx L., Eens M. (2004). Assessment of residency and movement of the bullhead (*Cottus gobio*) in two Flemish rivers. *Ecology of Freshwater Fish* 13:317–322.
- Komarow V.T. (1971) Speeds of fish movement. *Vestnik Zoologii* 4:67–71.
- Kottelat M. & Persat H. (2005). The *genus Gobio* in France, with redescription of *G. gobio* and description of two new species (*Teleostei: Cyprinidae*). *Cybium*, 29(3): 211-234.
- Kreitmann L. (1932). La vitesse de nage des poissons. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 53: 145-1 80
- Kulišková P., Horký P., Slavík O., Jones J.I. (2009). Factors influencing movement behaviour and home range size in ide *Leuciscus idus*. *Journal of Fish Biology* 74:1269-1279.
- Lafaille P., Caraguel JM., Legault A. (2007). Temporal patterns in the upstream migration of European glass eels (*Anguilla anguilla*) at the Couesnon estuarine dam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Volume 73, Issues 1–2, Pages 81–90
- Larinier M. & Dartiguelongue J. (1989). La circulation des poissons migrateurs : le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. *Bull. Fr. Pisc.*, 312-313, 94p.
- Larinier M., Chorda J. (1993). Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs. *Rapport Ghaappe* 93.05. 14p.
- Larinier M. & Porcher J.P., Travade F., Gosset C. (1994). Passes à poissons. *Expertise, Conception des ouvrages de franchissement*. Collection Mise au point.
- Larinier M., Chorda J., Ferlin O. (1995). Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs. *Etude expérimentale*. *Rapport Ghaappe* 95/05-Hydre 161.25p
- Larinier M. & Travade F. (1999). La dévalaison des migrateurs : problèmes et dispositifs. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 353-354, 181-210.
- Larinier M., Travade F. (2002). The design of fishways for shad. *Bull.Fr.Pêche Piscic.*, 364 suppl : 135-146.
- Larinier M. & Travade F. (2002). Downstream Migration : Problems and Facilities. *Bull.Fr.Pêche Piscic.*, 364 suppl : 181-207.

- Larinier M., Courret D., Gomes P. (2006). Guide technique pour la conception des passes “ naturelles ”. Rapport Ghaappe RA.06.05-v1. 66 p.
- Lauritzen D.V., Hertel F., Gordon M.S. (2005). A kinematic examination of wild sockeye salmon jumping up natural waterfalls. *Journal of Fish Biology* 67 ; 1010-1020.
- Lauritzen D.V., Hertel F.S., Jordan L.K., Gordon M.S. (2010). Salmon jumping: behaviour, kinematics and optimal conditions, with possible implications for fish passageway design. *Bioinspiration and Biomechanics*, doi: 10.1088/1748-3182/5/3/035006.
- Law T.C. & Blake R.W. (1996) Comparison of the faststart performances of closely related, morphologically distinct 82 threespine sticklebacks (*Gasterosteus* spp.). *Journal of Experimental Biology* 199:2595–2604.
- Legault A. (1986). Comportement d'escalade de l'anguille et colonization du bassin versant de la Sèvre Niortaise. Les publications de l'ENSA de Rennes n°3, 41p.
- Legault A. (1987). L'anguille dans le bassin de la Sèvre Niortaise. *Biologie, écologie, exploitation*. Les publications de l'ENSA de Rennes n°6, 305p.
- Legault A. (1992). Etude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles. *Bull. Fr. Pêche Piscic. N*) 325, p83-91.
- Lévêque C. & Paugy D. (1999). Les poissons des eaux continentales africaines. Diversité, écologie, utilisation par l'homme. IRD, 521pp (éditeurs scientifiques).
- Lévêque C. & Paugy D. (2006). Les poissons des eaux continentales africaines. Diversité, écologie, utilisation par l'homme. IRD éditions.
- Lucas M.C. & Batley E. (1996). Seasonal movements and behaviour of adult barbel *Barbus barbus*, a riverine cyprinid fish: implications for river management. *Journal of applied Ecology* 33:1345–1358.
- Lucas M. C. & Fear P. A. (1997). Effects of a flow gauging weir on the migratory behaviour of adult barbel, a riverine cyprinid. *Journal of Fish Biology* 50:382–396.
- Lucas M.C. (2000). The influence of environmental factors on movements of lowland-river fish in the Yorkshire Ouse system. *Science of the Total Environment* 251/252:223–232.
- Lucas M.C. & Baras E. (2001). *Migration of freshwater Fishes*. Oxford : Blackwell Science, 420 p.
- Lucas M. C. & Bubb D. H. (2005). Seasonal movements and habitat use of grayling in the UK. Science Report: SC030210/SR Environment Agency / Grayling Research Trust.
- Mc Cleave (1980). Swimming performance of European eel elvers, *J. Fish. Biol.*, 16, 445-452.
- Mc Cleave, J.D., G.P. Arnold, J.J. Dodson and W.H. Neill (editors). 1984. *Mechanisms of Migration in Fishes*. Plenum, N.Y. 574 p
- Mesa M.G., Bayer J.M., Seelye J.G. (2003). Swimming performance and physiological responses to exhaustive exercise in radio-tagged and untagged Pacific lampreys. *Transactions of the American Fisheries Society* 132:483-492.
- Meixler M.S., Bain M.B., Walter M.T. (2009). Predicting barrier passage and habitat suitability for migratory fish species. *Ecological Modelling* 220:2782-2791.
- Meyer L. (2001). Spawning migration of grayling *Thymallus thymallus* (L., 1758) in a Northern German lowland river. *Archiv für Hydrobiologie* 152:99-117.
- Molls F. (1997). New insights into the migration and habitat use by bream and white bream in the floodplain of the River Rhine. *Journal of Fish Biology* 55:1187-1200
- Nathan R, Getz WM, Revilla E, Holyoak R, Saltz D, Smouse PE. (2008). A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 05:19052–19059.
- Nordén, B. & Appelqvist, T. (2001). Conceptual problems of ecological continuity and its bioindicator. *Biodiversity and Conservation* 10, 779-791.
- Northcote T.G. (1979). Mechanisms of fish migration in rivers. In: *Mechanisms of migration in fish* (eds J.D.
- Ohlson M., Tryterud E. (1999). Long-term spruce forest continuity - a challenge for a sustainable Scandinavian forestry. *Forest Ecology and Management* 124: 27-34
- Økland B., Bakke A., Hågvar S. and Kvamme T. (1996). What factors influence the diversity of saproxylic beetles? A multi-scaled study from a spruce forest in southern Norway. *Biodiversity and Conservation* 5: 75-100.
- Ovidio M. (1999). Tactiques et stratégies individuelles d'utilisation spatiotemporelle de l'habitat et des ressources alimentaires chez la truite commune (*Salmo trutta* L.) : étude par radiopistage dans l'Aisne et l'Ourthe. Thèse de Doctorat de l'Université de Liège.

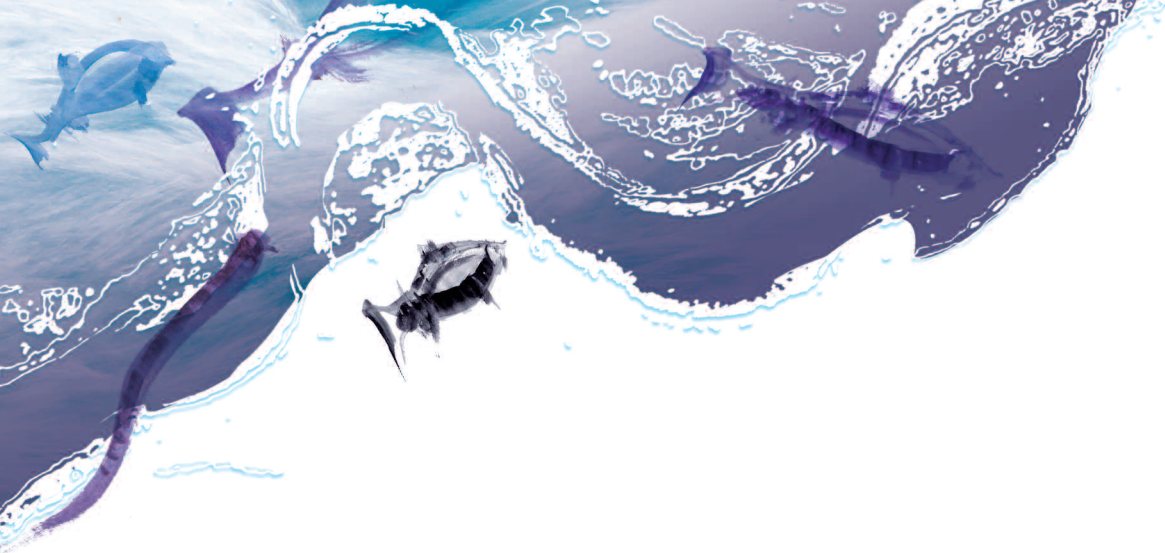


- Ovidio M. & Philippart J-C. (2002). The impact of small physical obstacles on upstream movements of six species of fish. *Hydrobiologia* 483:55-69.
- Ovidio M., Parkinson D., Sonny D., Philippart J-C. (2004). Spawning movements of European grayling *Thymallus thymallus* in the River Aisne (Belgium). *Folia Zoologica* 53:87-98.
- Ovidio M. & Philippart J. C. (2005). Long range seasonal movements of northern pike (*Esox lucius* L.) in the barbel zone of the River Ourthe (River Meuse basin, Belgium). In: M. T. Spedicato, G. Lembo, G. Marmulla (eds.), *Aquatic telemetry: advances and applications*, 191-202 pp., FAO/COISPA, Rome, 296 pp.
- Ovidio, M., Capra, H. & Philippart, J.C. (2007). Field protocol for assessing small obstacles to migration of brown trout *Salmo trutta*, and European grayling *Thymallus thymallus*: a contribution to the management of free movement in rivers. *Fisheries Management and Ecology* 14, 41-50.
- Ovidio M., Parkinson D., Philippart J.C., Baras E. (2007). Multiyear homing and fidelity to residence areas by individual barbel (*Barbus barbus*). *Belgian Journal of Zoology*, 137, 183-190.
- Ovidio M., Neus Y., Rimbaud G., François A., Philippart J.C. (2007). Suivi scientifique de l'efficacité des nouvelles échelles à poissons sur la Berwinne aux barrages de Berneau et de Mortroux. Bilan global des études et perspectives. Rapport final au Ministère de la Région Wallonne, DGRNE-Division de l'Eau, Direction des Cours d'eau non navigables. Université de Liège, Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie, 160 pages (avril 2007).
- Ovidio M. & Philippart J.C. (2008). Movement patterns and spawning activity of individual nase *Chondrostoma nasus* (L.) in flow regulated and weir fragmented rivers. *Journal of Applied Ichthyology*, 24:256-262.
- Ovidio M., Philippart J.C., Neus Y., Rimbaud G., Paquer F., Dierckx A. (2009). Développement d'une méthodologie de fixation des conditions d'installation des centrales hydroélectriques sur les cours d'eau non navigables de Wallonie afin de limiter leur impact sur la qualité écologique et les ressources piscicoles des milieux. Tome 3 : Évaluation d'aménagements de protection environnementale en place ou sur le point d'être construits au niveau de sites hydro-électriques. Rapport de convention pour le Service Public de Wallonie Division de l'Eau Direction des Cours d'Eau Non Navigables. Université de Liège LDPH, 75 p.
- Ovidio M, Detaille A., Bontinck C., Philippart J.C. (2009). Movement behaviour of the small bentic Rhine Sculpin *Cottus rhenanus* (Freyhof, Kottelat & Nolte, 2005) as revealed by radio-telemetry and pit-tagging. *Hydrobiologia*, 636, 119-128.
- Pallo S. & Larinier M. (2002). Définition d'une stratégie de réouverture de la Dordogne et de ses affluents à la dévalaison des salmonidés grands migrateurs. Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison. Rapport MIGADO D2-02-RT / GHAAPE RA.02.01, 25 p. + annexes.
- Paragamian V.L., Hardy R., Gunderman B. (2005). Effects of regulated discharge on burbot migration. *Journal of Fish Biology* 66, 1199-1213.
- Parkinson D., Philippart J.-C., Baras E. (1999). A preliminary investigation of spawning migrations of grayling in a small stream as determined by radio-tracking. *J. Fish. Biol.* 55: 172–182.
- Pavlov D.S., (1994). The downstream migration of young fishes in rivers: mechanisms and distribution. *Folia Zoologica*, 43, 193-208.
- Peake S., Beamish F.W.H., McKinley R.S., Scruton D.A., Katopodis C. (1996). Relating swimming performance of lake sturgeon, *Acipenser fulvescens*, to fishway design. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 54, 1361–1366.
- Philippart J.C. & Ovidio M. (1999). Le comportement migrateur des poissons en Wallonie. Caractérisation biologique et implication pour une gestion durable des populations. Communication au colloque GIPPA "Quel avenir pour nos poissons en Wallonie ?" La Marlagne (Wépion), 5-6 novembre 1999.
- Philippart, J.C. & Ovidio, M., (2007). Définition de bases biologiques et éco-hydrauliques pour la librecirculation des poissons dans les cours d'eau non navigables de Wallonie. Identification des priorités d'action d'après les critères biologiques et piscicoles. Rapport final au Ministère de la Région Wallonne, DGRNE-Division de l'Eau, Direction des Cours d'eau non navigables. Université de Liège, Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie, (avril 2007), 71 pages.
- Pohlmann K., Grasso F.W., Breithaupt T. (2001). Tracking wakes: the nocturnal predatory strategy of piscivorous catfish. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98, 7371–7374.

- Powers P. & Osborn J. (1985). Analysis of barriers to upstream fish migration. U.S. Dept. of Energy, Bonneville Power Adm., Div. Of Fish and Wildlife, Final Project Rep., 120 p.
- Prchalova M., Vetesnik L., Slavik O (2006). Migrations of juvenile and subadult fish through a fishpass during late summer and fall. *Folia Zoologica*, 55, 162-166.
- Prchalova M., Horky P., Slavik O., Vetesnik I., Halacka K. (2011). Fish occurrence in the fishpass on the lowland section of the River Elbe, Czech Republic, with respect to water temperature, water flow and fish size. *Folia Zoologica*, 60, 104-114.
- Quintella B.R., Andrade N.O., Koed A., Almeida P.R. (2004). Behavioural patterns of sea lampreys' spawning migration through difficult passage areas, studied by electromyogram telemetry. *Journal of Fish Biology* 65, 961-972.
- Rice E., Kadavy K.C., Robinson K.M. (1998). Roughness of loose rock riprap on steep slopes. *J. Hydraul. Eng.* 124:179-185.
- Roche P. & Broche L. (2005). Etude par radiopistage de la migration de l'Alose dans le Rhône aval. Rapport intermédiaire de la convention CNR-CSP n°1537, 58 pp.
- Rose F (1974). The epiphytes of oak. In: Morris MG and Perring FH (eds) *The British Oak. Its History and Natural History*, pp 250-273. EW Classey, Faringdon.
- Slavík O., Horký P., Bartoš L. (2009). Occurrence of cyprinids in fish ladders in relation to flow. *Biologia* 64, 999-1004.
- Solà C., Ordeix M., Pou-Rovira Q., Sellàres N., Queralt A., Bardina M., Casamitjana A., Munné A. (2011). Longitudinal connectivity in hydromorphological quality assessments of rivers. The ICF index : A river connectivity index and its application to Catalan rivers. *Limnetica*, 30(2) :273-292.
- Sonny D. (2006). Etude des profils de dévalaison des poissons dans la Meuse moyenne belge. Thèse de Doctorat de l'Université de Liège, 294 pp.
- Sonny D., Jorry S., Watriez X., Phillipart J.C. (2006). Inter- annual and diel patterns of the drift of cyprinid fishes in a small tributary of the Meuse River, Belgium. *Folia Zoologica* 55: 75–85.
- Sörenson I. (1951). An investigation of some factors affecting the upstream migration of the eel. *Inst. Freshwat. Res., Drottningholm, Rep 32*, 126-132.
- Steinbach P. (2006). Expertises des obstacles à la libre circulation de l'anguille, note méthodologique. 17 pp.
- Stuart T.A. (1962) The leaping behaviour of salmon and trout at falls and obstructions. *Freshwater and Salmon Fisheries Research* 28, 1–46.
- Stuart I.G., Zampatti B.P., Baumgartner L.J. (2008). Can a low-gradient vertical-slot fishway provide passage for a lowland river fish community? *Marine and Freshwater Research* 59, 332-346
- Taylor R.N. & Love M. (2003). *California Salmonid Stream Habitat Restoration Manual – Part IX Fish Passage Evaluation at Stream Crossings*. Sacramento, CA: California Department of Fish and Game, 100 p.
- Travade F., Larinier M., Subra S., Gomes P., De Oliveira E. (2010). Franchissement des aménagements hydroélectriques par l'anguille argentée en dévalaison. Etude des voies de franchissement de l'usine hydroélectrique de Baigts de Béarn (64). Test d'exutoires de dévalaison et de grilles fines. Rapport EDF R&D H-P 76-2009-02948-FR.
- Travade F. & Larinier M. (2006) French experience in downstream migration devices. In: *Free passage for Aquatic Fauna in rivers and other water bodies*. International DWA-Symposium on water resources management. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, pp. 91-99. ISBN 978-3-939057-19-2.
- Tsukamoto K., Kajihara T., Nishiwaki M. (1975). Swimming ability of fish. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 41, 167-174.
- Tudorache C., Viaene P., Blust R., Vereecken H., De Boeck, G. (2008). Comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species. *Ecology of Freshwater Fish* 17, 284-291.
- US Department of Agriculture-Forest Service Stream-Simulation Working Group (2008). *Stream Simulation : An Ecological Approach to Providing Passage for Aquatic Organisms at Road-Stream Crossings*.
- Utzinger, J., Roth C., Peter A. (1998). Effects of environmental parameters on the distribution of bullhead *Cottus gobio* with particular consideration of the effects of obstructions. *Journal of Applied Ecology* 35: 882–892.
- Veronese, A. (1937). Erosion of a bed downstream from an outlet, Colorado A & M College, Fort Collins, United States.

- Videler J.J. (1993). "Fish Swimming" Chapman & Hall, 206p.
- Voegtli B. & Larinier M. (2000). Etude sur les capacités de franchissement des civelles et anguillettes. Site hydroélectrique de Tuilières sur la Dordogne (24) et Barrage estuarien d'Arzal sur la Vilaine (56). Rapport Ghaappe RA00.05/ Migado G15-00-RT.
- Voegtli B. & Larinier M. (2002). Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique. Propositions d'aménagements. Gave d'Oloron et ses principaux affluents. Rapport de synthèse, DDAF 64, 35 p.
- Voegtli B. & Larinier M. (2008a). Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique. Cours d'eau du Gave de Pau. Rapport MIDIVAL – GHAAPPE – ECOGEA pour la DDTM 64, RA 08.01, 46 p. + annexes.
- Voegtli B. & Larinier M. (2008b). Définition d'une stratégie de restauration de l'axe de migration pour l'anguille. Cours d'eau du Gave de Pau. Rapport MIDIVAL – GHAAPPE – ECOGEA pour la DDTM 64, RA 08.02, 42 p. + annexes.
- Voegtli B. (2010a). Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique. Bassin de la Nive. DDTM 64 – ECOGEA, 52 p. + annexes.
- Voegtli B. (2010b). Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des anguilles argentées. Bassin de la Nive. DDTM 64 – ECOGEA, 46 p. + annexes.
- Wang R.W & Hartlieb A. (2011). Experimental and field approach to the hydraulics of nature-like pool-type fish migration facilities. KMAE n°400, 05. DOI :10.1051/kmae/20110011.
- Wardle C.S. (1980). Effects of temperature on the maximum swimming speed of fishes. Pp.519-531. In "Environmental Physiology of Fishes", Plenum Press (Ed). 723p.
- Washington Department of Fish and Wildlife. (2009). Fish Passage and Surface Water Diversion Screening Assessment and Prioritization Manual. Washington Department of Fish and Wildlife. Olympia, Washington.
- Washington Department of Fish and Wildlife. (2000). Fish passage barrier and surface water diversion screening assessment and prioritization manual. Washington Department of Fish and Wildlife.
- Winter E. & Fredrich F. (2003). Migratory behaviour of ide: a comparison between the lowland rivers Elbe, Germany, and Vecht, The Netherlands. Journal of Fish Biology, 63, 871-880.
- Whoriskey F.G. & Wootton R.J. (1987). The swimming endurance of threespine sticklebacks, *Gasterosteus aculeatus* L., from the Afon Rheidol, Wales. Journal of Fish Biology, 30, 335-339.
- Yasuda, Y. & Ohtsu, I. (1999). Flow Resistance of Skimming Flow in Stepped Channels. Proceedings of 28th IAHR Congress, Graz, Austria, Session B14, 6 pages.
- Zeng L.Q., Cao ; Z.D., Fu S.J., Peng J.L., Wang Y.X. (2009). Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 153, 125-130.
- Zerrath H. (1996). Sprintleistungen einheimischer Klein- und Jungfische in Sohlgleitenmodellen – Daten zur Bewertung von Fischaufstiegshilfen. Fischökologie 9, 27–48.
- Zhou Y. (1982). The swimming speed of fish in towed gears, a reaximination of the principles. Dept. of Agriculture and Fisheries for Scotland. Pap. 4, 55p.





Principaux sigles & abréviations

■ **a, b, c** : Hauteur (a), longueur (b) et diagonale (c) d'un redan (exprimée en m). La valeur de c est égale à $\sqrt{a^2+b^2}$. La valeur a_{\max} et c_{\max} correspondent à la hauteur et la diagonale maximale qu'un redan ne doit pas dépasser pour être franchissable par le poisson à condition que l'écoulement soit de surface (skimming flow). Les valeurs a_{\max} et c_{\max} dépendent de la longueur du poisson.

a_{\max} : Valeur de hauteur maximale d'un redan toléré pour qu'il puisse être franchissable. Cette valeur doit être inférieure à 0,5 L_p .

c_{\max} : Valeur de diagonale maximale d'un redan tolérée pour qu'il puisse être franchissable. Cette valeur doit être inférieure à 0,7 L_p .

■ **α** : Angle d'incidence du jet, ce qui correspond à la pente du coursier d'un seuil (exprimé en degré).

■ **β** : Angle d'incidence de saut d'un poisson (exprimé en degré).

■ **DH** : Hauteur d'une chute, ce qui correspond à la différence entre les niveaux d'eau amont et aval d'une chute. Elle correspond à la différence entre Zamont et Zaval (exprimée en m).

DH_{max} : Correspond à une hauteur de chute théorique maximale franchissable associée à des poissons de taille $L_{p_{\max}}$

DH_{mim} : Correspond à une hauteur de chute théorique maximale franchissable associée à des poissons de taille $L_{p_{\min}}$

DH_{moy} : Correspond à une hauteur de chute théorique maximale franchissable associée à des poissons de taille $L_{p_{\text{moy}}}$

DH_{extrême} : Correspond (pour les seuils verticaux, seuils à parement incliné ou passages en sous-verse) à une hauteur de chute totalement infranchissable pour une espèce ou un groupe d'espèces données et pour laquelle l'analyse ICE n'est pas nécessaire. Cette valeur correspond à la hauteur de chute DH_{\max} ajoutée d'une revanche de l'ordre de 0,5 à 1 m suivant les espèces. Dès lors que la chute créée par l'obstacle est supérieure à $DH_{\text{extrême}}$, l'ouvrage est inévitablement une barrière totale.

■ **g** : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s²).

■ **h** : Tirant d'eau d'un écoulement (en m).

h_{\min} : Tirant d'eau minimal extrême (ou épaisseur de la lame d'eau minimale) pour permettre la nage d'un poisson (exprimée en m). Cette épaisseur est fonction de la morphologie et la taille des espèces. Dans le cadre du protocole, une valeur de h_{\min} est fournie par espèces ou groupe d'espèces. Elle correspond globalement à la hauteur moyenne de l'espèce ou groupe d'espèces considérées (h_p). Cette valeur est utilisée notamment dans le diagnostic des seuils à parement incliné.

h_{\min} enroch : Tirant d'eau minimal extrême (ou épaisseur de la lame d'eau minimale) pour permettre la nage d'un poisson (exprimée en m) et assurer un écoulement cohérent sur des seuils en enrochements. Cette épaisseur est fonction de la morphologie des individus mais également de la pente du coursier. Dans le cadre du protocole, une valeur de h_{\min} enroch est fournie par espèces ou groupe

d'espèces. Cette valeur est utilisée notamment dans le diagnostic des seuils en enrochements ou dans le diagnostic préalable de passes rustiques en enrochements.

■ **hp** : Hauteur de poisson (en m). Cette valeur est fonction de la morphologie des individus et correspond à la longueur du poisson par un facteur de forme (k).

hp_{min} : Hauteur minimale d'une espèce donnée relative au stade biologique considéré dans le cadre du protocole ICE. Cette hauteur correspond à un individu de taille $L_{p_{min}}$.

hp_{max} : Hauteur maximale d'une espèce donnée relative au stade biologique considéré dans le cadre du protocole ICE. Cette hauteur correspond à un individu de taille $L_{p_{max}}$.

hp_{moy} : Hauteur correspondant à la moyenne entre hp_{min} et hp_{max} . Cette hauteur correspond à un individu de taille $L_{p_{moy}}$.

■ **H** : Charge d'eau sur un déversoir ou une échancrure ou sur une vanne. Elle est exprimée en m.

Hamont : Cette variable correspond à la charge sur une vanne en charge. Ce critère est utilisé dans le cas d'un diagnostic ICE sur des écoulements sous vannes ou orifices en charge mais présentant des écoulements dénoyés par l'aval.

H_{min} : Charge minimale extrême sur un obstacle pour permettre le passage d'une espèce (exprimée en m). Cette charge correspondant à Zamont-Zseuil est fonction de la morphologie et la taille des migrateurs. Une valeur de H_{min} est fournie pour chacune des espèces ou groupe d'espèces sauteuses. Ce critère est notamment utilisé dans le diagnostic de chute verticale ou dans le diagnostic de passes à poissons.

■ **Hf** : Profondeur d'eau de la fosse en pied d'un obstacle (exprimée en m). Hf_{min} est la profondeur d'eau minimale nécessaire au poisson pour franchir un obstacle. Hf_{min} est fonction de la hauteur de chute et de l'angle d'incidence α du jet.

Hf_{min} : Profondeur de fosse minimale extrême nécessaire au poisson pour franchir un obstacle. Elle est fonction de la hauteur de chute et de l'angle d'incidence α du jet. Cette valeur est utilisée pour le diagnostic de chute verticale ou quasi-verticale ou pour le diagnostic de seuil à parement incliné.

■ **L** : longueur d'un ouvrage à franchir (exprimée en m). Ce critère est utilisé dans le cas de diagnostic de passages routiers ou ferroviaires ou dans le cas d'un diagnostic spécifique sur l'anguille lorsque l'ouvrage présente une voie de reptation.

L_p : Longueur totale d'un poisson en mètre.

L_{pmin} : Taille minimale d'une espèce donnée relative au stade biologique considéré dans le cadre du protocole ICE.

L_{pmax} : Taille maximale d'une espèce donnée relative au stade biologique considéré dans le cadre du protocole ICE.

L_{p moy} : Taille correspondant à la moyenne entre $L_{p_{min}}$ et $L_{p_{max}}$.

■ **n** : Coefficient de Manning. Ce coefficient est représentatif de la rugosité du fond et des berges dans un écoulement.

■ **OV** : Ouverture d'un organe mobile (exprimée en m).

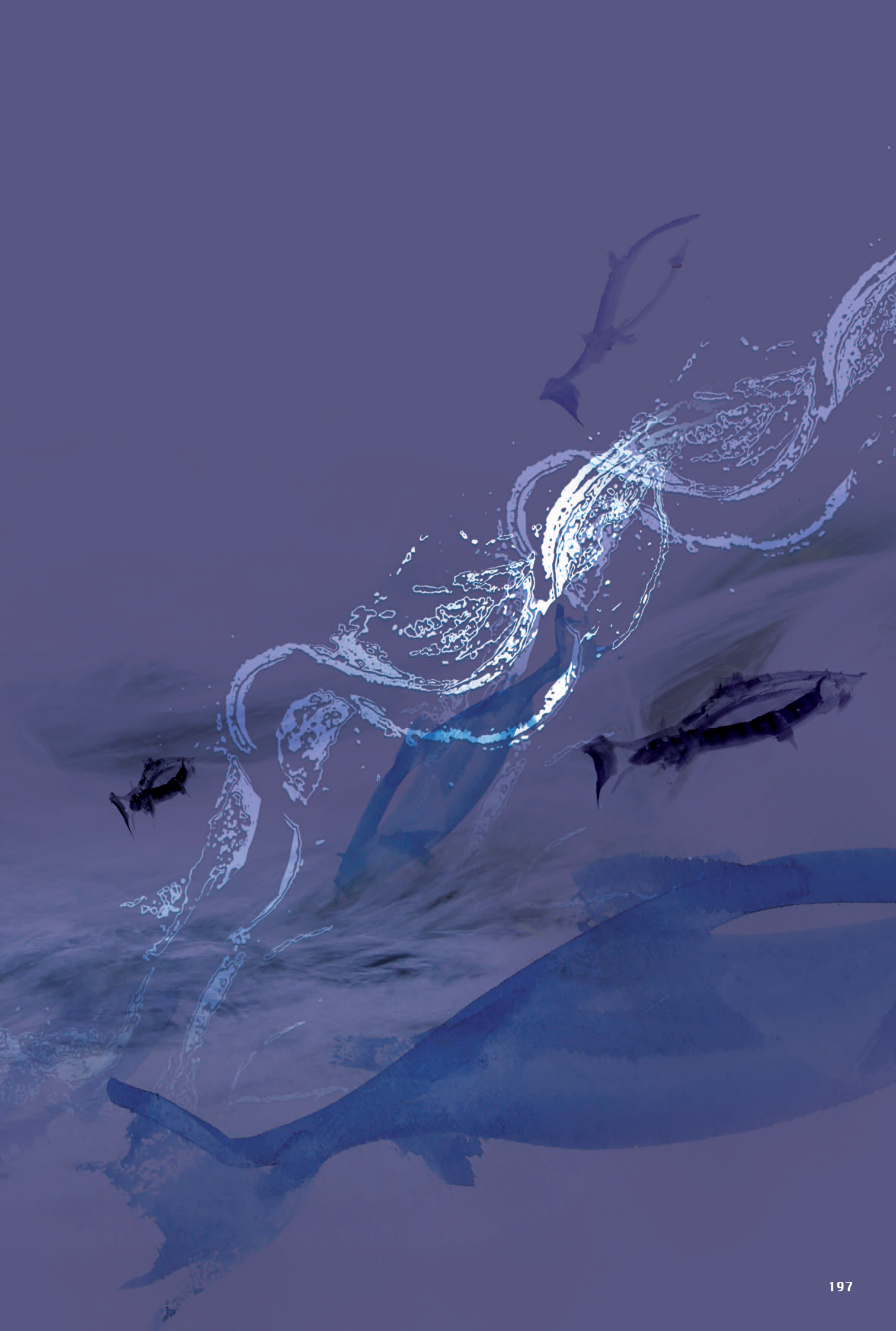
OV_{min} : Ouverture minimale extrême (en m) nécessaire d'un organe mobile pour assurer le passage de l'espèce piscicole considérée. Dans le cadre du protocole, une valeur de h_{min} est fournie par espèces ou groupe d'espèces. Cette valeur est utilisée dans le diagnostic des organes mobiles.

■ **P_{aer}** : Puissance musculaire maximale correspondant à la glycolyse aérobie. Elle correspond à la vitesse limite (supérieure) de croisière U_{Cr} avant le passage en anaérobie.

■ **P_{ana}** : Puissance musculaire maximale correspondant à la glycolyse anaérobie. Elle est proportionnelle à la vitesse maximale U_{max} .

- **P_v** : Puissance dissipée volumique. Cette puissance est un indicateur simple du niveau d'agitation dans les bassins d'une passe à poissons (exprimée en Watts/m³).
- **q** : Débit unitaire soit le débit par mètre de largeur (exprimé en m³/s/m ou m²/s).
- **t ou t_u** : Temps (ou endurance) pendant lequel le poisson peut nager à une vitesse U. L'endurance d'un poisson t_{u_{max}} à sa vitesse de sprint U_{max} est généralement comprise entre 10 et 20 secondes (exprimée en s).
- **U** : Vitesse de nage d'un poisson (exprimée en m/s).
 - U_{max} correspond à la vitesse de sprint ou vitesse maximale de nage d'un poisson.
 - U_{cr} correspond à sa vitesse de croisière, c'est à dire à une vitesse pouvant être maintenue pendant des heures.
- **V** : vitesse d'un écoulement donné (exprimée en m/s).
- **X_{max}** : Longueur de saut théorique d'un poisson donné, calculé à partir de la vitesse de sprint U_{max} du poisson et de l'angle d'incidence β du saut (exprimée en m).
- **Y_{max}** : Hauteur de saut théorique d'un poisson donné, calculé à partir de la vitesse de sprint U_{max} du poisson et de l'angle d'incidence β du saut. En pratique, on rajoute une partie de la longueur du poisson (exprimée en m).
- **Z_{amont}** : Cote de la ligne d'eau en amont d'un obstacle (exprimée en m ou mNGF).
- **Z_{aval}** : Cote de la ligne d'eau en aval d'un obstacle (exprimée en m ou mNGF).
- **Z_{seuil}** : Cote d'un seuil (exprimée en m ou mNGF).







Remerciements

■ Les auteurs tiennent en premier lieu à remercier très chaleureusement M. Jean-Pierre Porcher qui a été à l'origine de cet ambitieux projet et qui l'a soutenu dans ses différentes phases jusqu'à son départ en retraite. Nous tenons également à remercier le groupe de travail réuni en 2008 et 2009 (Agence européenne de l'environnement, EDF, Inra, Irstea, Onema, Université de Liège, Voies navigables de France) qui a permis de préciser, en l'état des connaissances scientifiques et des moyens techniques actuels, les objectifs atteignables et les limites de la méthode que nous allons ensuite développer. Nos profonds remerciements vont également à Mme Camille Barnetche qui a accompagné et soutenu ce travail, qui a fortement contribué à sa promotion au sein de l'ensemble du paysage des acteurs de l'eau, et qui nous a fait bénéficier de ses relectures attentives et de ses éclairages vis-à-vis de la législation environnementale.

■ Nous souhaitons par ailleurs saluer l'investissement de MM. Philippe Dupont et René Lalement, respectivement directeur de l'action scientifique et technique et directeur de la connaissance et de l'information sur l'eau à l'Onema, quant au bon déroulement de ce projet de recherche et développement, et à sa déclinaison en termes d'acquisition et de diffusion de nouvelles connaissances environnementales majeures. Leur soutien constant a été particulièrement précieux et a permis de surmonter bon nombre d'obstacles pour la production de cette innovation scientifique et technique en des temps relativement contraints.

■ Nous tenons à remercier très fortement les agents, les techniciens et les ingénieurs des délégations interrégionales et des services départementaux de l'Onema qui ont, tout au long du projet, testé, éprouvé et contribué à l'amélioration des versions successives du protocole ICE. Ils ont également acquis un important jeu de données sur l'ensemble du territoire qui a permis d'analyser la robustesse des premiers résultats et qui permettra de disposer rapidement à l'avenir des premières analyses ICE sur certains axes hydrographiques. Sans ce travail de plusieurs années, nous n'aurions jamais réussi à développer une telle méthode.

■ Nous souhaitons par ailleurs exprimer notre chaleureuse reconnaissance à la famille de M. Michel Larinier qui a consentie à le laisser s'investir pleinement dans ce projet, bien après la date officielle de son départ en retraite. Merci de nous avoir laissé bénéficier de son indispensable expertise.

■ Un grand merci aussi à MM. Samuel Dembski, Karl Kreutzenberger et Nicolas Poulet, pour leurs appuis scientifiques et techniques à certaines étapes du projet. Merci à MM. Philippe Baran, Dominique Baril et Pierre Boyer, ainsi qu'à Mme Claire Roussel pour leurs relectures attentives de certaines parties du document et pour leurs conseils.

■ L'évaluation de la franchissabilité des ouvrages repose sur un grand nombre de connaissances, parfois complexes, qu'il a fallu synthétiser et combiner de la manière la plus claire possible. Sans la richesse des illustrations et la qualité du travail des graphistes, nous n'aurions sans doute pas pu atteindre une qualité pédagogique suffisante pour un tel document. Nous tenons ainsi à saluer particulièrement le travail de M. Christian Couvert (Graphies©) et de Mme Béatrice Saurel, ainsi qu'à remercier tous les auteurs qui nous ont cédé gracieusement des photographies.

■ Enfin, un très grand merci à Mme Véronique Barre qui par son dynamisme et son efficacité de travail nous a portés et aidés à franchir toutes les étapes du processus de maquettage et d'édition de cet ouvrage, dont nous avons sans doute sous-évalué la hauteur avant les premiers sauts !

Rédaction

Jean-Marc BAUDOIN (Onema), Vincent BURGUN (Onema DIR03),
Matthieu CHANSEAU (Onema DIR07), Michel LARINIER (Onema),
Michaël OVIDIO (Univ- de Liège), William SREMSKI (Onema DIR08),
Pierre STEINBACH (Onema DIR04), Bruno VOEGTLE (Ecogea).

Edition

Véronique Barre (Onema DAST)
veronique.barre@onema.fr

Création et mise en forme graphiques

Béatrice Saurel (saurelb@free.fr) - création, illustrations d'art et mise en forme graphique
Graphies (graphies@graphies.fr) - création des schémas

Citation

Baudoin J.M., Burgun V., Chanseau M., Larinier M., Ovidio M., Sremski W., Steinbach P. et Voegtle B., 2014.
Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. Onema. 200 pages





La collection **Comprendre pour agir** accueille des ouvrages issus de travaux de recherche et d'expertise mis à la disposition des enseignants, formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs et des gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques.

Déjà parus

1- Eléments d'hydromorphologie fluviale

(octobre 2010)

2- Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière

(mai 2011)

3- Evaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels

(décembre 2011)

4- Evolutions observées dans les débits des rivières en France

(décembre 2012)

5- Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ?

(décembre 2012)

6- Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ?

(avril 2013)

7- Captages Grenelle : au-delà de la diversité, quels caractères structurants pour guider l'action ?

(septembre 2013)

8- Les évaluations économiques en appui à la gestion des milieux aquatiques

(octobre 2013)

9- Les dimensions sociales des politiques de l'eau

(décembre 2013)

10- Comment développer un projet ambitieux de restauration d'un cours d'eau ?

Retours d'expériences en Europe, un point de vue des sciences humaines et sociales

(février 2014)

11- Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons

Principes et méthodes

(mai 2014)



ISBN : 979-10-91047-29-6

Achévé d'imprimer en France par I.M.E en mai 2014.
Cet ouvrage a été réalisé avec des encres végétales sur du
papier PEFC 100% issu de forêts gérées
durablement et de sources contrôlées, chez un
imprimeur respectant toutes les normes environnementales.



La communauté internationale a progressivement pris conscience des enjeux relatifs à la fragmentation des habitats et l'a traduit en divers textes réglementaires : en Europe, la directive cadre sur l'eau est un exemple éloquent appliqué aux milieux aquatiques. L'objectif généralement visé est une restauration ou une préservation de la continuité écologique des hydrosystèmes et de leurs corridors rivulaires, devant permettre de réduire, voire de stopper une part du déclin de la biodiversité actuellement observé.

Au sein des écosystèmes aquatiques, l'ampleur souvent insoupçonnée de la présence d'obstacles transversaux sur les réseaux hydrographiques (plus de 70 000 obstacles déjà recensés en France) est l'une des premières causes de dégradation de la continuité écologique, en particulier pour les poissons qui accomplissent de nombreux déplacements indispensables à leur survie. Le diagnostic de ces altérations est donc un préalable nécessaire à l'évaluation de la gravité de la problématique sur les territoires et à l'identification des secteurs prioritaires en termes d'interventions.

La disponibilité d'une méthode d'évaluation simple et robuste, harmonisée, et applicable par une large gamme d'acteurs de l'environnement est ainsi rapidement devenue une nécessité. L'Onema s'est emparé de cette problématique et a coordonné le développement d'un protocole dénommé "Informations sur la continuité écologique" ou ICE.

Richement illustré, ce numéro de la collection *Comprendre pour agir* présente le résultat de ces travaux, en particulier les concepts, la méthode de construction et la procédure détaillée d'application du protocole ICE. Il synthétise également les principales connaissances scientifiques et techniques internationales, en ce qui concerne les enjeux relatifs à la continuité écologique pour l'ichtyofaune, les capacités physiques des différentes espèces de poissons métropolitaines, les différents types d'obstacles pouvant être rencontrés et leurs impacts, ainsi que les principaux types de dispositifs de franchissement existants.

Plus généralement, ce *Comprendre pour agir* doit permettre à chacun de comprendre précisément la méthodologie développée, de l'appliquer sur son territoire, voire d'utiliser tout ou partie des connaissances rassemblées pour d'autres besoins spécifiques.

Jean-Marc BAUDOIN, docteur en écologie fonctionnelle, directeur du pôle Onema-Irstea d'études et de recherches "hydroécologie des plans d'eau", a coordonné pendant cinq ans différents projets nationaux relatifs à l'hydromorphologie et à la continuité écologique des milieux aquatiques continentaux au sein de la direction générale de l'Onema.

Vincent BURGUN, ingénieur (AgroParisTech-Engref), unité d'appui technique aux politiques de l'eau à la délégation interrégionale du Nord Est de l'Onema, intervient principalement dans le domaine du diagnostic et de la restauration de la continuité écologique.

Matthieu CHANSEAU, docteur en biologie, expert auprès du ministère, responsable des thématiques "Continuité écologique" et "Programmes et réseaux Migrateurs" au sein de la délégation interrégionale Sud-Ouest de l'Onema, travaille depuis de nombreuses années sur l'impact des différents obstacles érigés sur les cours d'eau et sur le comportement des poissons.

Michel LARINIER, docteur-ingénieur en hydraulique, expert scientifique, a été responsable du GHAAPE, du Pôle Ecohydraulique de l'Onema et directeur de l'équipe de recherche technologique "Aménagement des cours d'eau à poissons migrateurs", a effectué trente années d'appui technique, de recherches et d'expérimentations dans le domaine de l'écohydraulique.

Michaël OVIDIO, docteur en sciences, expert scientifique et maître de conférence à l'université de Liège, responsable du laboratoire de démographie des poissons et d'hydroécologie (LDPH), unité de biologie du comportement - centre de recherche en ichtyologie fondamentale et appliquée AFFISH-RC.

William SREMSKI, maître ès sciences, ingénieur responsable de l'unité Connaissance de l'état et des usages à la délégation interrégionale Massif Central de l'Onema.

Pierre STEINBACH, ingénieur hydrobiologiste (ISIM), unité d'appui technique aux politiques de l'eau à la délégation interrégionale Centre Poitou-Charentes de l'Onema, travaille plus de vingt ans sur la continuité écologique de la Loire et de ses affluents et à la coordination de bassin Loire-Bretagne.

Bruno VOEGTLE, ingénieur en génie civil (ENSIP) et en hydraulique (ENSEEIH) et cogérant du bureau d'études ECOGEA (Etudes et Conseils en Gestion de l'Environnement Aquatique) basé à Pins-Justaret (Haute Garonne), s'est spécialisé dans le domaine de l'écohydraulique et plus particulièrement en continuité piscicole.

