




Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is a Publisher's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/25690>

To cite this version:

Kreutzenberger, Karl and Sagnes, Pierre  and Valade, Pierre and Voegtlé, Bruno *Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons et les macro-crustacés dans les départements insulaires ultramarins. Principes et méthode.* (2019) (Comprendre pour agir ; 34). Agence française pour la biodiversité (service éditions). ISBN 978-2-37785-072-3

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr



Informations sur la continuité écologique - ICE

Évaluer le
franchissement des obstacles
par les poissons et macro-crustacés dans
les départements insulaires **ultramarins**

Principes et méthode

Karl Kreutzenberger, Pierre Sagnes,
Pierre Valade et Bruno Voegtlé

N°34



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

L'Agence française pour la biodiversité

Créée le 1er janvier 2017, l'Agence française pour la biodiversité (AFB) est un établissement public du ministère de la Transition écologique et solidaire. En métropole et en outre-mer, elle a pour mission d'améliorer la connaissance, de protéger, de gérer, et de sensibiliser à la biodiversité terrestre, aquatique et marine.

Au 1er janvier 2020, l'Office français de la biodiversité regroupera les 2 700 agents de l'Agence française pour la biodiversité (AFB) et de l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS).

Cet établissement, sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Alimentation et de l'Agriculture, aura cinq missions :

- la police de l'environnement ;
- la connaissance, la recherche et l'expertise sur les espèces et les milieux ;
- l'appui à la mise en œuvre des politiques publiques de la biodiversité ;
- la gestion et l'appui aux gestionnaires d'espaces naturels ;
- la mobilisation de la société civile.

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'Agence française pour la biodiversité (professionnels.afbiodiversite.fr/fr/node/706), sur le portail documentaire partenarial *Les documents sur l'eau et la biodiversité* (www.documentation.eauetbiodiversite.fr)



Informations sur la continuité écologique - ICE


Évaluer le
franchissement des obstacles
par les poissons et macro-crustacés dans
les départements insulaires ultramarins

Principes et méthode



Karl Kreutzenberger, Pierre Sagnes,
Pierre Valade et Bruno Voegtlé

Avant-propos



La fragmentation des milieux naturels est l'une des principales causes d'érosion de la biodiversité (*European Environment Agency*, 2011). L'impact des obstacles à l'écoulement se manifeste par :

- un effet « barrière », pouvant empêcher certains organismes d'atteindre des habitats favorables à l'accomplissement de leur cycle vital ;
- et 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 - DCE, loi sur l'eau et les milieux aquatiques - Lema, Grenelle de l'environnement...) et à l'ensemble des enjeux environnementaux de la restauration de la continuité écologique des milieux aquatiques, l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema), qui a intégré en 2017 l'Agence française pour la biodiversité (AFB), a initié et coordonné l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation du franchissement des obstacles à l'écoulement par les poissons en métropole : « informations sur la continuité écologique » (ICE). Cette méthodologie est présentée dans un ouvrage publié en 2014 (Baudoin *et al.*, 2014), dont la déclinaison opérationnelle a fait l'objet d'un protocole distinct, adapté au terrain (Burgun *et al.*, 2015).

Méthodologie et protocole de terrain s'appuient sur une importante synthèse de connaissances scientifiques internationales, sur les productions scientifiques et techniques d'un groupe de travail composé d'experts français (Onema et bureau d'études Ecogea) et belges (université de Liège) ainsi que sur le retour d'expérience de terrain des agents en charge de la mise en œuvre de la restauration de la continuité écologique dans les cours d'eau. L'objectif était de disposer d'une capacité d'analyse opérationnelle simple, robuste, objective et homogène pour l'évaluation du risque d'entrave au déplacement des poissons généré par la présence d'un obstacle transversal à l'écoulement des eaux.

De par leurs caractéristiques tropicales, les cours d'eau des territoires ultramarins français présentent un fonctionnement hydrologique et une faune aquatique très différents de ceux rencontrés en métropole. Les ouvrages hydrauliques qui les parsèment peuvent également présenter des caractéristiques particulières. De ce fait, la méthodologie d'évaluation du franchissement des obstacles par les espèces piscicoles développée et utilisée en métropole ne peut pas être appliquée directement dans ces milieux.

Reprenant les grands principes de la méthodologie métropolitaine, l'objectif de ce document est de l'adapter au contexte physique (types d'obstacles) et biologique (poissons et macro-crustacés) des départements insulaires ultramarins. Au même titre qu'en métropole, cette méthode, fiable et standardisée, qui repose sur des principes et des observations scientifiques, permet d'évaluer le risque d'entrave généré par les obstacles en confrontant leurs caractéristiques typologiques, géométriques et hydrauliques aux capacités de franchissement des espèces de poissons et macro-crustacés considérés.






AVERTISSEMENT

Le présent document ne traite pas de l'efficacité des dispositifs de franchissement potentiellement adossés à un obstacle hydraulique. Cette situation, encore peu fréquente en outre-mer, est laissée à une expertise spécifique.

De plus, compte tenu de la complexité des mécanismes biologiques de dévalaison des individus et de la nécessité d'avoir une bonne connaissance de l'hydrologie, des modalités de prélèvement et des caractéristiques des installations, la méthode ICE ne s'attachera pas à l'évaluation de la franchissabilité des ouvrages à la dévalaison.

Enfin, ce document ne constitue pas le protocole de mise en œuvre sur le terrain, par ailleurs décliné dans une publication distincte, et garant d'un dimensionnement, d'une sécurisation des opérations de terrain et d'une pratique standardisée (Burgun *et al.*, 2015).

Résumé



La fragmentation des milieux naturels est l'une des principales causes d'érosion de la biodiversité. Face à l'intérêt du maintien d'habitats favorables suffisamment diversifiés et connectés entre eux, afin que les espèces animales et végétales puissent assurer leurs besoins vitaux et éventuellement s'adapter aux changements environnementaux, la communauté internationale a notamment traduit sa volonté d'agir en divers textes réglementaires. C'est ainsi que la directive cadre européenne sur l'eau (DCE, 2000) a appuyé l'intérêt de connaissance, de préservation ou de restauration des continuités écologiques au sein des hydrosystèmes et des corridors rivulaires.

Certains ouvrages transversaux en cours d'eau (plus de 100 000 sont actuellement recensés en France) sont susceptibles de dégrader la continuité écologique dans les écosystèmes aquatiques.

Dans ce contexte, il est apparu essentiel de développer des démarches de diagnostic standardisées, permettant d'appréhender, sur un territoire donné, les risques d'altération de la continuité écologique générés par les obstacles à l'écoulement, notamment en termes de mobilité de la faune aquatique. C'est dans ce contexte, dès la fin des années 2000, que l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema), depuis intégré à l'Agence française pour la biodiversité (AFB), s'est emparé de cette problématique et a coordonné, pour la métropole, le développement d'une méthodologie ICE « Informations sur la continuité écologique », visant à permettre l'évaluation du niveau d'impact des obstacles à l'écoulement sur le déplacement des principales espèces de poissons métropolitains (Baudoin *et al.*, 2014).

Dans les départements insulaires d'outre-mer, un recensement en cours fait d'ores et déjà état de plus de 1 000 obstacles présents sur les cours d'eau. Ces ouvrages sont, pour certains, susceptibles d'entraver voire de bloquer les déplacements indispensables aux espèces de poissons et de macro-crustacés, quasi toutes amphihalines, pour boucler leur cycle de vie.

L'évaluation de leurs impacts potentiels sur la continuité écologique était jusqu'à présent essentiellement confiée à l'expertise de quelques personnes. Or, les enjeux comme le nombre de barrières à évaluer, le partage simplifié des connaissances et de concepts communs, entre acteurs par ailleurs d'horizons divers (maîtres d'ouvrage, bureaux d'études, gestionnaires, administrations, etc.), impliquent de proposer une méthodologie transparente à la fois robuste scientifiquement, objective, compréhensible et applicable en un minimum de temps. Fort de l'expérience du déploiement d'ICE en métropole, l'AFB, en collaboration avec l'ensemble des directions





de l'environnement, de l'aménagement et du logement et des offices de l'eau, et dans le cadre d'une réalisation menée avec Écogea et Ocea consult', a coordonné et permis l'adaptation de cette méthode aux départements et régions d'outre-mer, couvrant ainsi les îles de la Guadeloupe, de la Martinique, de Mayotte et de La Réunion.

Organisé en trois chapitres, ce *Comprendre pour agir* propose une synthèse des principales connaissances scientifiques et techniques internationales sur le sujet et présente la méthodologie proposée :

■ **un premier chapitre** présente les enjeux de la continuité écologique pour l'ichtyofaune et la carcinofaune d'outre-mer. Il expose les typologies d'obstacles rencontrés, les enjeux écologiques et fonctionnels relatifs à la libre circulation des espèces de poissons et de macro-crustacés concernées, et décrit pour chacune d'elles les principaux déterminants environnementaux, éthologiques et physiques conditionnant leurs possibilités et capacités de franchissement ;

■ **un second chapitre** expose les concepts fondateurs de la méthode ICE adaptée aux départements insulaires d'outre-mer, son domaine d'applicabilité, les groupes d'espèces considérés, leurs caractéristiques et les cinq classes de franchissabilité indicatrices du niveau d'impact des obstacles sur leurs déplacements à la montaison ;

■ **un troisième chapitre** aborde en détail la méthode proposée en explicitant les étapes de diagnostic de la franchissabilité des obstacles à la montaison, grâce à des logigrammes et des textes d'accompagnement. Ce chapitre précise ainsi, pour les configurations d'obstacles généralement rencontrées, les critères de définition des classes de franchissabilité. Confrontant les variables hydrauliques et physiques de l'obstacle évalué aux capacités de franchissement des espèces, il permet une analyse point par point, justifiée, de la franchissabilité de l'ouvrage par celles-ci. Poussant l'analyse aux capacités spécifiques de certains taxons, il propose également un schéma d'évaluation et de diagnostic du franchissement propre à la reptation par les anguilles, au ventousage et à l'escalade par les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques ainsi qu'à la marche par les macro-crustacés

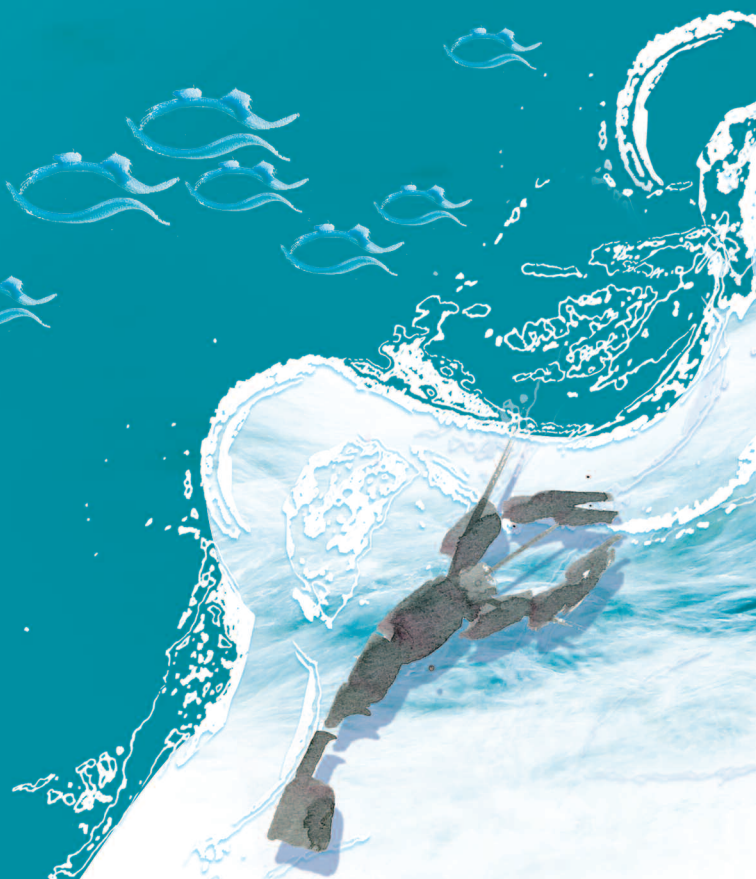
Richement détaillé et illustré, ce *Comprendre pour agir* permet à chacun de comprendre précisément la méthodologie développée, ses fondements et ses enjeux, et d'appliquer ces savoirs sur son territoire.

Mots clés :

espèces, poissons, macro-crustacés, obstacles, méthode, analyse, capacités, franchissement, outre-mer

Sommaire

8	■ Introduction
11	■ A. Continuité écologique, ichtyofaune et carcinofaune
47	■ B. Principes généraux de la méthode ICE
71	■ C. Diagnostic de la franchissabilité à la montaison
157	■ Références





Introduction



La continuité écologique : origine et définition

La continuité écologique est une acception récente, introduite pour la première fois par le botaniste britannique Francis Rose (Rose, 1974). Bien que cette terminologie soit particulièrement évocatrice lorsque l'on s'intéresse aux écosystèmes aquatiques continentaux, qui sont par nature structurés par des écoulements et par leur continuum, les premières recherches portées sur cette thématique sont nées de l'écologie terrestre, en particulier de l'écologie des paysages et de l'étude des systèmes forestiers. Les termes « continuité des paysages », « continuité biologique » ou « connectivité » sont également souvent employés et régulièrement associés aux notions de corridors écologiques ou de trames écologiques (trames verte et bleue par exemple).

Plusieurs définitions de la continuité écologique existent, mais la vision la plus répandue aujourd'hui concernant les écosystèmes aquatiques se rapproche du concept de « continuité des paysages » (Økland *et al.*, 1996 ; Fritz et Larsson, 1996 ; Ohlson et Tryterud, 1999). Elle correspond à « la notion d'habitats disponibles dans le temps et dans l'espace, et à 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 prise en compte réglementaire et le contexte français

La directive cadre européenne sur l'eau (DCE, 2000) a généralisé l'emploi de ce néologisme au sein du monde des acteurs de l'eau, mais 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 » au sein des cours d'eau. C'est notamment en ce sens qu'elle représente un élément de qualité à part entière, nommé « continuité de la rivière », dans le cadre de l'évaluation de l'état écologique.

En France, la loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006 (Lema, 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 bon 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 dans des conditions hydrologiques favorables).





La présence et la multiplication d'ouvrages transversaux érigés par l'homme au sein des cours d'eau pour divers usages (source d'énergie, eau potable, irrigation, navigation, stabilisation du lit, aquaculture, loisirs...) ont fortement modifié la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Faisant obstacles à l'écoulement des eaux, ils peuvent altérer les possibilités de déplacement des biocénoses, modifier voire dégrader la qualité des milieux aquatiques, appauvrir la diversité des habitats disponibles pour les différentes espèces et modifier la qualité physico-chimique de l'eau. Les conséquences sur les communautés biologiques peuvent alors être dramatiques. L'exemple le plus emblématique est celui des poissons migrateurs amphihalins, dont les sites de fraie fonctionnels peuvent être ennoyés et leur accès altéré voire totalement interdit par la présence d'ouvrages transversaux.

Pour près de 50 % des masses d'eau de surface (rapportage DCE, 2016), l'altération de l'hydromorphologie, et notamment de la continuité écologique, est identifiée comme responsable des risques de non atteinte du bon état écologique. La fragmentation des cours d'eau est une entrave directe à leur bon fonctionnement, et donc à la préservation de la qualité des milieux aquatiques et de la biodiversité.

En France, en 2018, plus de 100 000 ouvrages (barrages, seuils...) ont déjà été référencés sur les cours d'eau au sein du référentiel des obstacles à l'écoulement (ROE). Dans ce contexte, il est apparu essentiel de développer de nouveaux « moyens » de diagnostic standardisés, permettant d'appréhender sur un territoire les risques d'altération de la continuité écologique générés par les obstacles à l'écoulement, notamment en termes de mobilité de la faune aquatique.

Une démarche d'évaluation de la franchissabilité des obstacles

L'Onema (qui, depuis 2017, a intégré l'AFB) s'est emparé de cette problématique et a coordonné le développement méthodologique d'ICE - pour « **informations sur la continuité écologique** » - en métropole, visant à permettre l'évaluation du degré d'impact des obstacles à l'écoulement sur le déplacement des principales espèces de poissons métropolitains (Baudoin et al., 2014). En complément, un document spécifique déclinant sa mise en œuvre sur le terrain a été produit (Burgun et al., 2015).

Les barrières pouvant impacter la libre circulation de la faune aquatique peuvent être de nature physico-chimique (température, oxygène, pollution...) ou de nature physique (chute, vitesse de courant, turbulences, assec, tirant d'eau trop faible...). Au vu des connaissances scientifiques disponibles, la méthode a été exclusivement dédiée aux effets des **ouvrages transversaux de nature physique sur la circulation des poissons.**

Ces connaissances acquises en métropole font désormais l'objet d'une banque de stockage et d'analyse des résultats (<https://geobs.brgm.fr/>).

L'adaptation de la démarche au contexte de l'outre-mer

Les départements français d'outre-mer présentent également un nombre important d'obstacles transversaux sur les réseaux hydrographiques. En 2018, le ROE en recense d'ores et déjà plus de 1 000.

Aussi, c'est tout naturellement que l'AFB, en collaboration avec l'ensemble des DEAL et des offices de l'eau des territoires ultramarins, a souhaité **adapter la démarche d'évaluation ICE à l'ensemble des départements et régions d'outre-mer (Drom).** Les grands principes de la démarche, c'est-à-dire la confrontation des caractéristiques topographiques et hydrauliques au niveau d'un ouvrage et des capacités physiques de déplacement des espèces, restent les mêmes qu'en métropole.



Les départements ultramarins insulaires (Guadeloupe, Martinique, Mayotte et Réunion) présentent une forte similitude entre les familles indigènes de poissons et de macro-crustacés rencontrées (Tabouret, 2012), et les connaissances scientifiques permettent aujourd'hui de pouvoir estimer les besoins de migration et les capacités de franchissement des espèces concernées. Ces espèces, toutes amphihalines, nécessitent des allers-retours entre les milieux dulçaquicole et marin pour achever leur cycle vital, et sont donc très sensibles aux barrières physiques érigées sur les cours d'eau (Tabouret, 2013).

Pour le département de la Guyane, l'absence notable de connaissance sur la biologie et les capacités migratoires des nombreuses espèces piscicoles locales a conduit, par précaution, à ne pas intégrer ce territoire dans la démarche. **Aussi, dans le cadre de ce document, seuls les Drom insulaires ont été considérées.**

Les îles de la Martinique, de la Guadeloupe, de La Réunion et de Mayotte présentent toutes une diversité importante en crustacés décapodes d'eau douce. Ces espèces font localement l'objet de fortes traditions patrimoniales et culinaires. De tailles parfois imposantes, elles sont communément capturées lors des échantillonnages de poissons (pêche électrique ou piégeage). Régulièrement seuls représentants des espèces diadromes dans les parties hautes des bassins versants, les crustacés décapodes représentent ainsi de forts enjeux pour la biodiversité de la macrofaune aquatique tropicale insulaire. **Les macro-crustacés ont donc naturellement été intégrés à la démarche ICE.**

Pour faciliter sa compréhension et son appropriation, le présent document reprend volontairement des éléments de présentation et de rédaction de la méthodologie métropolitaine (Baudoin *et al.*, 2014), notamment dans les fondements techniques et scientifiques acquis, qu'il transpose aux spécificités des espèces et milieux insulaires d'outre-mer.


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

- **le premier chapitre** expose, sur la base d'une synthèse des connaissances scientifiques actuelles, l'importance de la continuité écologique pour les poissons et macro-crustacés. Au sein de ce chapitre, une synthèse des capacités physiques de franchissement des différentes espèces est également présentée, en précisant les paramètres qui permettent de les évaluer et les principaux facteurs qui conditionnent ces franchissements ;
- **le deuxième chapitre** décrit les principes généraux de la méthode adaptée aux départements insulaires d'outre-mer. Il définit son cadre d'application et les principaux types d'obstacles traités. Il présente également la liste des groupes d'espèces, associées en fonction de leurs capacités de franchissement, et définit les classes de franchissabilité retenues ;
- **le troisième chapitre** précise la procédure de diagnostic de la franchissabilité des obstacles à la montaison pour les différents types d'obstacles.

Richement détaillé et illustré, cet ouvrage doit permettre à chacun de comprendre précisément la méthodologie développée, ses fondements et ses enjeux, et de l'appliquer sur son territoire. Il permet également d'utiliser, pour tout sujet lié, tout ou partie des connaissances rassemblées et présentées.



Continuité écologique, ichtyofaune et carcinofaune

- 
- 12 ■ Les enjeux de la circulation pour les poissons et les crustacés
- 33 ■ Les capacités de franchissement des poissons et des macro-crustacés



Les enjeux de la circulation pour les poissons et les crustacés

Contexte biologique, mobilité et migration

Comme beaucoup d'autres animaux libres (non fixés), les poissons et les crustacés doivent continuellement se déplacer entre différents habitats, à différentes échelles spatiales, 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 maximiser leur descendance et assurer la survie de l'espèce.

Les déplacements entre habitats différents s'inscrivent dans une séquence temporelle, calquée sur les besoins évolutifs des stades de vie des individus (par exemple pour les poissons : larve, alevin, juvénile et adulte). Dès lors, la structure spatiale d'une population est le résultat du comportement des individus qui la composent et qui se déplacent en fonction des ressources existantes dans les différents habitats accessibles au sein du cours d'eau.

Suivant leur objectif, ces déplacements s'expriment à des échelles de temps variables (journalière, saisonnière voire annuelle), 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 le cas des cours d'eau profonds).

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 aux futures générations (Lucas et Baras, 2001).

■ Les principaux mouvements chez les poissons et les crustacés décapodes

Les poissons et les crustacés sont mobiles au sein du continuum fluvial. Ils effectuent des déplacements réguliers entre différents habitats en fonction de leur stade de vie et de leurs activités, par exemple des allers-retours quotidiens entre zones de nourrissage et de repos. Ces déplacements réguliers sont généralement limités de quelques mètres à quelques dizaines de mètres au sein d'une succession d'habitats et sont dépendants des besoins et du comportement des individus (régime alimentaire, rythme d'activité...).



D'autres déplacements, à plus large échelle spatio-temporelle, sont nécessaires à l'accomplissement du cycle de vie des espèces. Les déplacements ontogéniques sont liés aux exigences d'habitat des différents stades de développement, à leurs capacités de mobilité, mais également à des facteurs environnementaux comme la disponibilité en nourriture. Dans le cas particulier des espèces des cours d'eau des Drom insulaires, ces migrations sont majoritairement effectuées sur l'axe longitudinal mais sont relativement peu documentées. Des migrations au sein du cours d'eau sont également provoquées par les très fortes crues qui peuvent survenir dans ces milieux tropicaux (dépressions cycloniques). Plusieurs suivis (Smith et Kwak, 2014a, 2014b ; Lagarde *et al.*, 2016) ont mis en évidence des mouvements d'adultes de mulot, d'*Eleotridae* et de *Sicydiinae* (sous-famille des *Gobiidae*) en lien avec une ou plusieurs crues cycloniques : les individus dévalent lors de la crue puis remontent le cours d'eau pour recoloniser progressivement les habitats qu'ils occupaient précédemment.

Enfin, viennent les migrations entre milieux dulçaquicole et marin, nécessaires à l'accomplissement du cycle de vie des espèces diadromes, ultra majoritaires chez les poissons et les crustacés d'eau douce des îles tropicales (McDowall, 1988, 2007 ; Keith, 2003 ; Bauer, 2013). Il peut exister une forte variabilité saisonnière dans la composition et l'abondance de ces flux migratoires. À titre d'exemple, cette variabilité a été mise en évidence à La Réunion, lors de suivis des migrations de montaison sur 3 embouchures de rivière, de 2007 à 2012 (Arda, 2012).

Afin de bien prendre en compte la libre circulation des espèces de poissons et de crustacés au travers d'aménagements des milieux aquatiques, **il est donc très important de bien connaître le comportement migratoire des différentes espèces** concernées dans les eaux courantes naturelles et régulées, notamment aux périodes critiques de leur activité migratrice (migrations nécessaires à l'accomplissement du cycle de vie).

■ Les différents types de migrants

Les peuplements de poissons et crustacés décapodes indigènes des Drom insulaires français (Martinique, Guadeloupe, Réunion et Mayotte) sont constitués d'espèces diadromes, vicariantes, complémentaires ou sporadiques. Les espèces primaires ou secondaires observées dans les eaux douces de ces territoires ont toutes été introduites par l'Homme (Lim *et al.*, 2002 ; Keith *et al.*, 2006 ; Monti *et al.*, 2010).

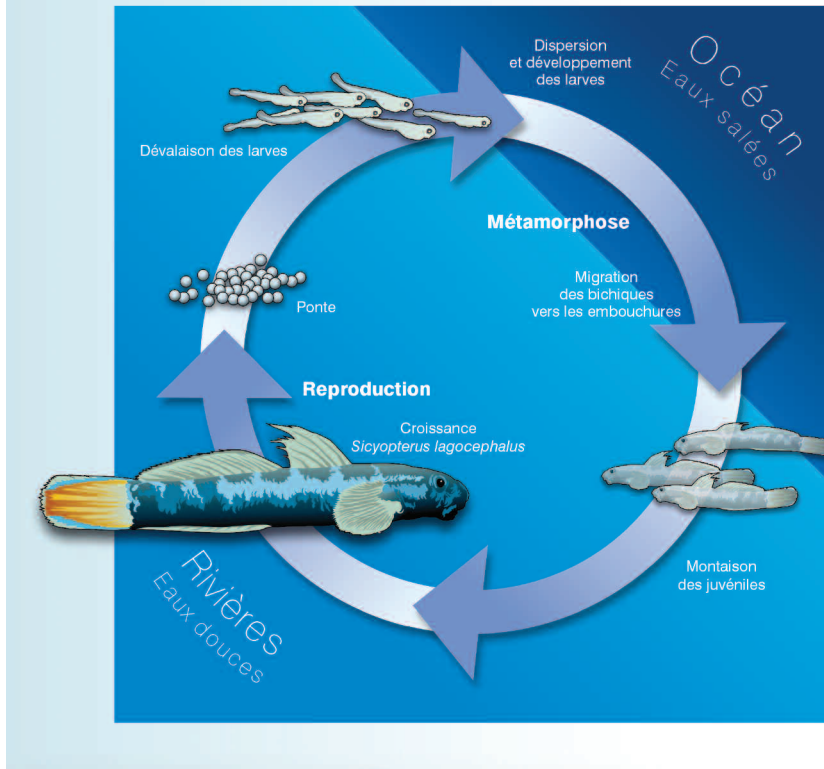
Les poissons et crustacés diadromes (amphidromes et catadromes) sont les plus représentés dans les cours d'eau, de l'embouchure jusqu'aux zones de sources, ainsi qu'en amont de chutes naturelles de plusieurs centaines de mètres (ex. : *Atyidae*, *Anguillidae* et *Sicydiinae* sur l'île de La Réunion). Les espèces vicariantes et sporadiques colonisent, quant à elles, les zones lenticules à l'aval des cours d'eau.

Type 1 : Les espèces amphidromes

L'amphidromie, définie par Myers (1949), est le type de migration le plus fréquemment observé chez les espèces de poissons et de crustacés des îles tropicales insulaires (McDowall, 2010). Les principales caractéristiques de l'amphidromie sont (McDowall, 2007, 2010) : une reproduction en eau douce, un retour aux conditions marines par des larves (ou « embryons-libres ») sans délai après l'éclosion, une période de croissance en mer pouvant s'étendre sur plusieurs mois, un retour en eau douce au stade juvénile (ou post-larve), une période de croissance en eau douce avant d'arriver à un stade mature, suivie d'une reproduction en eau douce (Figure 1 page 14 ; Tableaux 1 et 2 pages 15 et 16). Les adultes peuvent vivre plusieurs années en eau douce et se reproduire à plusieurs reprises.

Il peut arriver que les adultes des espèces de poissons amphidromes entreprennent une migration de dévalaison lors de la reproduction, mais sans atteindre l'océan.

Figure 1



Cycle migratoire d'un migrateur amphidrome (cas des Gobiidae). Modifié d'après Tabouret, 2012.

Chez les poissons, ce cycle de vie est généralisé pour les espèces d'eau douce de *Gobiidae* (Keith, 2003), mais aussi d'*Eleotridae* (Maeda *et al.*, 2008) ainsi que, *a priori*, pour les muets d'eau douce du genre *Agonostomus* (Smith et Kwak, 2014b). Chez les *Gobiidae* et les *Eleotridae*, plusieurs études et travaux de recherche ont permis de décrire, d'une part, les caractéristiques des larves à la dévalaison (Delacroix et Champeau, 1992 ; Bell et Brown, 1995 ; Maeda *et al.*, 2008 ; Valade *et al.*, 2009 ; Yamasaki *et al.*, 2011 ; Zydlewski et Wilkie, 2012 ; Ellien *et al.*, 2014) et, d'autre part, les stades et les rythmes de colonisation des embouchures (Bell, 1997 ; Fièvet et Le Guennec, 1998 ; Keith, 2003 ; Hoarau, 2005 ; Maeda *et al.*, 2007 ; Arda, 2012 ; Teichert, 2012 ; Teichert *et al.*, 2014). Cependant, les phases migratoires du muet d'eau douce du genre *Agonostomus* sont très peu documentées et ne font pas toujours consensus (Cruz, 1987 ; Phillip, 1993 ; Marcy *et al.*, 2005 ; McDowall, 2007), hormis quelques observations ponctuelles sur des phases de migration de jeunes individus de *Agonostomus monticola* en rivière (Voegtlé et Valade, *obs. in situ*).

Les crevettes d'eau douce des Drom insulaires (*Atyidae*, *Palaemonidae*) présentent également un cycle de vie amphidrome. On observe chez ces espèces deux principaux comportements lors de la phase de dévalaison (Bauer, 2013). Chez les espèces colonisant uniquement les petits systèmes hydrographiques (contexte insulaire) et les *Atyidae* en particulier, les femelles libèrent les larves dans le courant. D'un autre côté, il a été montré que chez plusieurs espèces du genre *Macrobrachium* et sur des hydrosystèmes continentaux de grande taille, les femelles grainées réalisent une migration de dévalaison jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres avant de libérer les larves (Bauer et Delahoussaye, 2008 ; Olivier, 2013). Les femelles grainées qui ont migré vers l'aval entreprennent ensuite une nouvelle migration de montaison pour recoloniser les habitats amont des cours d'eau.



À noter que de nombreux mollusques gastéropodes des îles tropicales insulaires ont également un cycle de vie amphidrome (McDowall, 2007). Les migrations de mollusques et en particulier de neritins peuvent être ponctuellement massives (Pyron et Covich, 2003 ; Blanco et Scatena, 2007).

Tableau 1 Liste des poissons amphidromes des différents Drom insulaires et caractéristiques des stades migratoires

Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom				Stade montaison	Stade dévalaison
			Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion		
Eleotridae	<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Dormitator maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nég, dormeur (C)	X	X			Post-larve / Juvénile	Œuf / Larve
	<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X				Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Eleotris klunzingerii</i> *	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X			Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X			Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X			Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)			X		Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)			X		Post-larve / Juvénile	Larve
Gobiesocidae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / têtard, macouba, colle-roche (C)	X	X			Post-larve / Juvénile	Œuf / Larve
Gobiidae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X			Post-larve / Juvénile / Adulte ?	Larve / Adulte ?
	<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X	Post-larve / Juvénile / Adulte ?	Larve / Adulte ?
	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X		Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X			Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X		Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Glossogobius kokius</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Mugilogobius mertoni</i>	Gobi millet (C)			X		Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Redigobius balteatus</i>	Gobie drapeau (F)			X		Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobi tase (C)			X		Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X			Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X			Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot à bec de lièvre, cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)			X	X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X	Post-larve / Juvénile	Larve
Mugilidae	<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)			X		Post-larve / Juvénile	Œuf / Larve
	<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F) / millet (C)	X	X			Post-larve / Juvénile	Œuf / Larve
	<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X	Post-larve / Juvénile	Œuf / Larve

*Dénomination de *E. fusca* d'après Mennesson et Keith (2017)

Tableau 2

Liste des crustacés décapodes amphidromes des différents Drom insulaires et caractéristiques des stades migratoires

Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom				Stade montaison	Stade dévalaison
			Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion		
Atyidae	<i>Atya innocous</i>	Crevette (F) / cacador, bouc, grand bouc (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve
	<i>Atya scabra</i>	Crevette (F) / cacador, bouc, grand bouc (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve
	<i>Atyoida serrata</i>	Crevette bouledogue (F) (C)			X	X	Juvenile / Adulte	Larve
	<i>Caridina longirostris</i>	Caridine à long rostre (F) / chevaquine (C)			X		Juvenile / Adulte	NR
	<i>Caridina serratirostris</i>	Caridine serratulée (F) / chevaquine (C)			X	X	Juvenile / Adulte	Larve
	<i>Caridina typus</i>	Caridine type (F) / chevaquine (C)			X	X	Juvenile / Adulte	Larve
	<i>Jonga serrei</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X				Juvenile / Adulte	Larve
	<i>Micratya poeyi</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve
	<i>Potimirim glabra</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X				Juvenile / Adulte	Larve
	<i>Potimirim potimirim</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve
Grapsidae	<i>Sesarmops impressum</i>	Crabe de rivière (C)			X		Juvenile	Larve / Adulte ?
	<i>Varuna litterata</i>	Crabe lisible (F) / crabe de rivière (C)			X	X	Juvenile	Larve / Adulte ?
Palaemonidae	<i>Macrobrachium acanthurus</i>	Écrevisse (F) / chevrette, bouquet canelle (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium australe</i>	Chevrette australe (F) / chevrette grand bras (C)			X	X	Juvenile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium carcinus</i>	Écrevisse (F) / ouassou, z'habitant, écrevisse, bouquet pintade (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium crenulatum</i>	Écrevisse (F) / queue rouge, écrevisse, queue de madras (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium equidens</i>	Crevette à pinces longues (F) / camaron tacheté, kanmaron (C)			X		Juvenile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium faustinum</i>	Écrevisse (F) / alexis, gros mordant, écrevisse (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve
	<i>Macrobrachium heterochirus</i>	Écrevisse (F) / grand bras, écrevisse (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium hirtimanus</i>	Chevrette des Mascariens (F) / écrevisse, chevrette lecroc (C) (disparue ?)				?	Juvenile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium lar</i>	Bouquet singe (F) / chevrette, camaron, kanmaron gran lebra (C)			X	X	Juvenile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium lepidactylus</i>	Écrevisse, bétangue (C)			X	X	Juvenile / Adulte	Larve / Adulte ?
<i>Palaemon pandaliformis</i>	Crevette transparente (F) / bouquet potitinga (C)	X	X			Juvenile / Adulte	NR	
Xiphocarididae	<i>Xiphocaris elongata</i>	Crevette (F) / pissette (C)	X	X			Juvenile / Adulte	Larve

NR : non renseigné

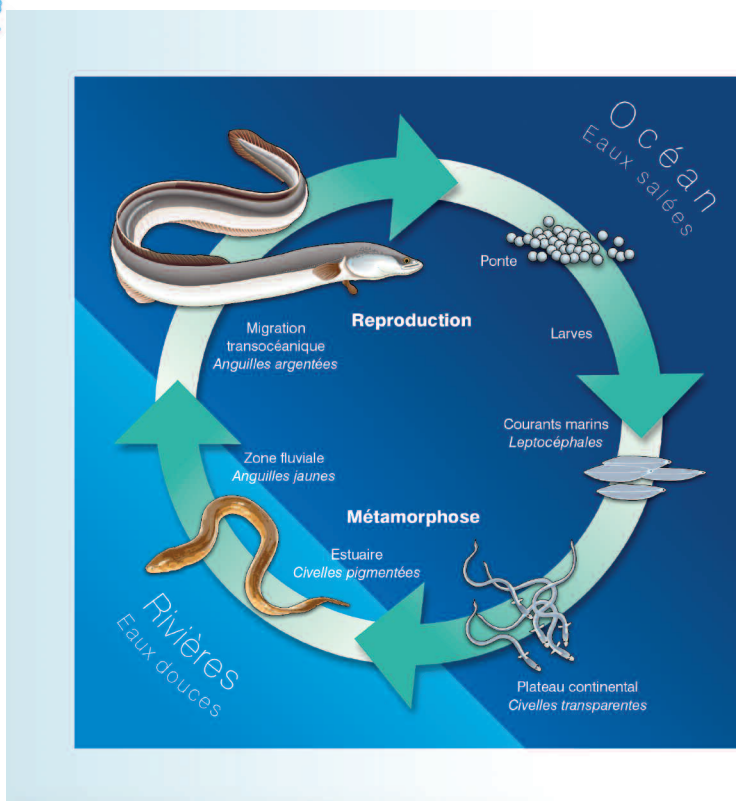
Type 2 : Les espèces catadromes

Les espèces migratrices 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. Elles remontent les fleuves au stade juvénile pour coloniser le réseau hydrographique, tandis que les adultes redescendent vers la mer pour s'y reproduire (Figure 2 ; Tableau 3).

Les espèces symboliques de ce groupe sont les anguilles. Cinq espèces d'anguilles sont présentes dans les départements insulaires d'outre-mer : *Anguilla rostrata* en Martinique et en Guadeloupe, *Anguilla marmorata*, *Anguilla mossambica*, *Anguilla bicolor bicolor* et *Anguilla bengalis* à La Réunion et à Mayotte. Les anguilles réalisent la majorité de leur cycle biologique en eau douce. Elles migrent en mer pour se reproduire. Après plusieurs mois passés en mer, les larves leptocéphales se métamorphosent en post-larves (civelles) qui colonisent les eaux douces. Les civelles migrent au sein des bassins versants pour se développer en anguillettes

puis anguilles jaunes. À maturité sexuelle, les anguilles se métamorphosent en anguilles argentées. Lors de ce dernier stade, elles s'adaptent progressivement à un retour à la vie marine et aux grandes profondeurs. Dans le sud-ouest de l'océan Indien, les périodes de colonisation des eaux douces par les civelles et leur taille varient selon les espèces et la localité (Robinet *et al.*, 2003 ; Reveillac, 2008). Les périodes de dévalaison des anguilles argentées sont peu documentées pour les milieux insulaires d'outre-mer (Robinet et Feunteun, 2002). Wouthuyzen *et al.* (2009) suggèrent que les anguilles tropicales peuvent migrer une majeure partie de l'année en mer pour se reproduire, excepté durant les mois les plus secs.

Figure 2



Cycle migratoire d'un migrateur amphihalin catadrome.

Tableau 3

Liste des poissons catadromes des différents Drom insulaires et caractéristiques des stades migratoires

Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom				Stade montaison	Stade dévalaison
			Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion		
Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Civelle / Anguilette	Adulte (anguille argentée)
	<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolor (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Civelle / Anguilette	Adulte (anguille argentée)
	<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Civelle / Anguilette	Adulte (anguille argentée)
	<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Civelle / Anguilette	Adulte (anguille argentée)
	<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X			Civelle / Anguilette	Adulte (anguille argentée)
Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (C)			X	X	Juvénile / Adulte	Adulte
	<i>Kuhlia savagii</i>	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (C)			X	X	Juvénile / Adulte	Adulte

Deux autres espèces de poisson présentent un cycle catadrome : les poissons plats *Kuhlia rupestris* et *Kuhlia sauvagii* (Feutry *et al.*, 2012b, 2013). Dans les territoires d'outre-mer, ces espèces sont présentes à Mayotte et La Réunion (Keith *et al.*, 2006 ; Feutry *et al.*, 2012a). Les observations de Lewis et Hogan (1987) suggèrent une migration de dévalaison et de reproduction pendant l'été austral, ce qui a été confirmé à La Réunion, où la période de reproduction efficace de *Kuhlia rupestris* a été mise en évidence d'octobre à août, avec une période principale de novembre à janvier (Arda, 2012). Les juvéniles de *Kuhlia rupestris* et de *Kuhlia sauvagii* colonisent les rivières après une durée de vie marine larvaire de 30 à 40 jours (Feutry *et al.*, 2012c), durée relativement courte par rapport aux espèces amphidromes des milieux insulaires ultramarins. À La Réunion, le recrutement en rivière s'étend sur une large période de l'année, avec un pic en janvier / février.

Type 3 : Les espèces vicariantes et sporadiques

Les poissons vicariants et sporadiques (Tableau 4) sont réputés non diadromes mais vivent indifféremment en eau douce ou en eau salée. Ils colonisent le cours aval des bassins versants, sans franchir les premières zones de rapides.

Faute de connaissances sur leur biologie, plusieurs espèces (*Agonostomus*, *Kuhlia*...) ont longtemps été classées vicariants ou sporadiques en raison de leur appartenance à des familles d'origine marine (Lim *et al.*, 2002 ; Keith *et al.*, 2006 ; Monti *et al.*, 2010) et ont été ensuite classées diadromes (amphidromes ou catadromes) suite à des études plus poussées (Feutry *et al.*, 2012b ; Smith et Kwak, 2014b). Par exemple, les syngnathes aujourd'hui classés vicariants semblent plutôt pondre en eau douce alors que leurs larves dévaleraient et se développeraient en mer. À La Réunion, des mâles grainés de *M. brachyurus* ont été observés jusqu'à plus de 2 km de l'embouchure (rivière des Marsouins, Valade, *obs. pers.*). Cette espèce pourrait être amphidrome ou semi-amphidrome (c.-à-d. cycle marin / saumâtre).

Il en est de même pour certaines espèces de crustacés décapodes inféodées aux habitats lenticques des cours aval de rivières ou de plans d'eau côtiers : *Palaemon concinnus* à La Réunion et à Mayotte par exemple. Pour ces espèces, les stades de montaison sont majoritairement des stades juvéniles, mais les stades de dévalaison ne sont pas connus (adultes ou larves). Peu connues, ces espèces ne peuvent, à ce jour, faire l'objet d'un diagnostic ciblé mais devront être prises en compte, au cas par cas, en fonction du contexte de l'ouvrage étudié.

Tableau 4 Liste des poissons vicariants et sporadiques des différents Drom insulaires et caractéristiques des stades migratoires

Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom				Stade montaison	Stade dévalaison
			Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion		
Ambassidae	<i>Ambassis ambassis</i>	Ambache du large, ambasse (F) / ambache (C)			X	X	Post-Larve / Juvénile	NR
	<i>Ambassis natalensis</i>	Ambache de natal (F) / ambache (C)			X	X	Post-Larve / Juvénile	NR
Megalopidae	<i>Megalops atlanticus</i>	Tarpon (F) / palika (C)	X	X			NR	NR
	<i>Megalops cyprinoides</i>	Tarpon (F)			X	X	NR	NR
Syngnathidae	<i>Microphis argulus</i>	Syngnathe virgule (F)			X	X	NR	NR
	<i>Microphis brachyurus</i>	Syngnathe à queue courte (F)		X		X	NR	Larve
	<i>Microphis lineatus</i>	Syngnathe à queue courte (F) / poisson brindille (C)	X				NR	NR

NR : non renseigné



Les différents types d'obstacles

Les barrières aux migrations des espèces diadromes peuvent être naturelles (chutes, assecs) ou liées à des aménagements anthropiques.

Parmi ces barrières, on observe des barrières physiques liées à des constructions en travers du cours d'eau (ouvrages routiers, seuils, pêcheries...) et des barrières hydrauliques liées notamment à un fort prélèvement d'eau pouvant alors entraîner des parcours à faibles tirants d'eau, voire totalement asséchés lorsque le prélèvement est couplé à des zones de très fortes infiltrations.

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 et/ou de crustacés (en 2018, le ROE en recense d'ores et déjà plus de 1 000 dans les Drom).

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. L'obstacle peut être partiel et n'être infranchissable que pour certains individus et peut être également temporaire, c'est à dire infranchissable seulement 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 (tentatives de franchissement répétées et infructueuses, concentration de prédateurs...).

Les obstacles peuvent créer des problèmes de franchissement :

■ **à la montaison**, c'est à dire lors des migrations en direction de l'amont des cours d'eau. Ce type de migration peut concerner par exemple :

- les post-larves ou juvéniles d'espèces amphidromes (*Gobiidae*, *Eleotridae*, ...) avant la reproduction, d'espèces catadromes (*Anguillidae* au stade anguilllette ou civelle) ou d'espèces holobiotiques (crabe de rivière),
- les adultes d'espèces amphidromes ou catadromes à la suite d'une dévalaison provoquée par un épisode de crue ou un événement de reproduction (*Macrobrachium* par exemple) ou d'adultes d'espèces holobiotiques (crabe de rivière) ;

■ **à la dévalaison**, c'est à dire lors des migrations en direction de l'aval des cours d'eau (vers la mer ou vers des zones de moindre altitude). Cette migration peut concerner i) les larves d'espèces amphidromes qui dévalent pour rejoindre l'océan afin d'y effectuer leur croissance jusqu'aux stades post-larvaire ou juvénile, comme les *Gobiidae* par exemple ou ii) les adultes d'espèces catadromes avant la reproduction, comme les anguilles.

■ Barrières impactant la montaison

Les chutes et les assecs naturels

Les profils des cours d'eau des départements insulaires d'outre-mer sont ponctués par des chutes de plusieurs mètres voire dizaines de mètres (Figure 3 page 20). Les îles de La Réunion et de La Guadeloupe abritent les exemples les plus marqués, avec de nombreuses rivières présentant des chutes supérieures à une dizaine de mètres dès le cours aval ou moyen (rivières Langevin, Sainte-Suzanne, des Roches, Saint-Jean etc. à La Réunion ; rivière Lézarde, Bois Malaisé, du Grand Carbet, du Petit Carbet, Moreau, du Galion, du Tambour etc. à La Guadeloupe). Les chutes les plus spectaculaires dépassent une centaine de mètres (chutes du Trou de Fer, du Bras Magasin à La Réunion ; chutes du grand et du petit Carbet à La Guadeloupe). Les cours d'eau de Mayotte présentent des chutes d'eau de plus faibles hauteurs, comme sur la rivière Coconi (cascade d'Hapandzo), la rivière Bouyouni et la rivière Chiconi (cascade de Soulou). Sur les cours d'eau de Martinique, les chutes sont relativement moins fréquentes (saut Argis, saut du Gendarme, cascades Saint-Didier).

Figure 3



a, b, d © B. Voegtli (Ecogea)
c © P. Valade (Ocea Consult')

Exemples de chutes naturelles.

(a) Cascade Niagara (La Réunion), (b) Cascade Paradis (Guadeloupe), (c) Chute naturelle (Martinique), (d) Cascade Boungoumouhé (Mayotte).

Ces obstacles, en limitant certains flux migratoires (notamment vers l'amont), ont des conséquences sur la distribution des poissons et des crustacés, mais dans une moindre mesure pour ces derniers, compte tenu de leurs capacités de déplacement par la marche (Fièvet, 1998 ; Fièvet et al., 2001). Certaines espèces d'*Atyidae* comme les cacadors (*Atya scabra* et *Atya innocous*), les pissettes (*Xiphocaris elongata*) et la crevette bouledogue (*Atyoida serrata*) auraient même des avantages à se développer en amont de certaines chutes naturelles, probablement du fait d'un plus faible risque de prédation, comme cela a été montré chez *Atya lanipes* et *Xiphocaris elongata* (Covich et al., 2009).

Au vu des fortes capacités d'infiltration des cours d'eau et des étiages parfois très sévères sur les côtes sous le vent, plusieurs cours d'eau des milieux insulaires ultramarins présentent de très faibles débits à l'étiage. Sur certains cours d'eau de La Réunion, cela se traduit par des assèchements naturels sur plusieurs centaines de mètres au sein de secteurs de cours d'eau pérennes (Bras de Sainte-Suzanne, rivière Langevin...) (Figure 4a). Sur certains cours d'eau (rivière Saint-Étienne, rivière des Galets...), ces assecs peuvent parfois être amplifiés par les prélèvements d'eau pour l'irrigation ou la production d'eau potable (Figure 4b)

Figure 4



© P. Valade (Ocea Consult')

Exemples d'assecs à La Réunion, possiblement naturels, mais amplifiés par des prélèvements d'eau en amont. (a) Bras Sainte-Suzanne, (b) Embouchure de la rivière des Galets.

Ces phénomènes sont également observés, mais très peu documentés, à Mayotte (rivières Rouaka, Mroni bé...). Par contre, ils semblent nettement plus rares au niveau des Antilles. Ces assecs naturels constituent des barrières infranchissables lorsqu'ils surviennent mais peuvent être franchis (montaison / dévalaison) dès le retour d'un débit suffisant. Il s'agit donc généralement de barrières temporelles.

N.B. Dans les milieux insulaires d'outre-mer, les principaux cours d'eau sont captés pour l'alimentation en eau potable ou l'irrigation, et leurs zones amont, à fort potentiel hydroélectrique du fait des dénivelés importants, sont fréquemment équipées de centrales. Dans un contexte insulaire où les eaux sont inégalement réparties dans l'espace et dans le temps, les enjeux liés à l'usage quantitatif de cette ressource sont exacerbés. Si la mise en application de débits réservés réglementaires (Lema, 2006) est un objectif prioritaire dans les Sdage 2016-2021 de ces départements, la mise en oeuvre de ces débits réservés est souvent difficile car elle remet en cause, une partie de l'année au moins, les autres usages. Dans ces cas de figure, il convient de bien préciser les effets d'une discontinuité hydraulique sur les peuplements de poissons et de macro-crustacés concernés (phases de recrutement, de reproduction ou de dévalaison) en fonction des enjeux écologiques portés par les habitats du cours d'eau, et d'essayer d'en minimiser les impacts en comparant des scénarios proposant différentes périodes et durées lors desquelles la continuité est assurée.

N.B. Étant donné la quantité d'obstacles naturels rencontrée dans les cours d'eau des milieux insulaires ultramarins, et dans une logique de restauration de la continuité à l'échelle d'un tronçon ou d'un cours d'eau, ces obstacles doivent être expertisés de façon à établir les enjeux biologiques sur les aménagements situés en amont. De ce fait, bien que l'objectif principal de la démarche ICE reste essentiellement de diagnostiquer la franchissabilité au niveau d'obstacles anthropiques, il est important de prendre en compte les obstacles naturels dans son application en outre-mer (afin d'établir les enjeux de restauration des continuités perturbées).

Concernant la définition de la franchissabilité de ces obstacles naturels, il est préférable de se référer autant que possible aux observations de terrain (expertise locale), et aux données d'inventaires, qui auront été menées en aval et en amont de ceux-ci. Ainsi, la présente méthode n'est pas appliquée à l'évaluation de la franchissabilité des obstacles naturels.

Les seuils et barrages

La majorité des seuils ou barrages implantés dans les territoires insulaires d'outre-mer a été construite au XX^e siècle pour prélever de l'eau à des fins d'irrigation, de distribution d'eau potable et/ou de production hydroélectrique.

Les extractions massives de matériaux alluvionnaires dans les lits des cours d'eau et l'endiguement des rivières se sont traduites par un impact considérable sur l'équilibre des cours d'eau. Ainsi, pour limiter leur incision ou pour conforter des ouvrages d'art existants (ponts, seuils...), un certain nombre de seuils de stabilisation en enrochements a été installé en complément. C'est le cas notamment des seuils de la traversée urbaine sur la rivière Capot à La Martinique, ainsi que des seuils de la traversée urbaine de Basse-Terre sur la rivière aux Herbes en Guadeloupe, ou encore du contre barrage du Bras de la Plaine à La Réunion.

On observe 3 principaux types d'ouvrages :

■ **les seuils de taille moyenne** (inférieure à 5 mètres en général, potentiellement jusqu'à une dizaine de mètres), qui sont marqués par la présence d'un coursier aval plus ou moins incliné. Sur ces ouvrages, l'eau s'écoule généralement sans décollement des écoulements ;

■ **les seuils droits ou barrages voûtes**, dont la crête est généralement profilée pour permettre le déversement de l'eau. Dans ces conditions, le parement aval du seuil est vertical et on observe souvent un décrochement de la lame d'eau à ce niveau. Ces ouvrages sont de taille plus importante que les précédents (jusqu'à une trentaine de mètres, comme pour le barrage de Takamaka II sur la rivière des Marsouins à La Réunion) ;

■ **les barrages poids en terre ou béton**, qui peuvent atteindre une hauteur de 20 à 25 mètres. Ils sont équipés d'un coursier de déversement à la côte d'équipement de la retenue. Ces ouvrages réservoirs sont stratégiques pour l'alimentation en eau potable (AEP) et l'irrigation sur les îles ou parties d'îles présentant de faibles ressources et dénivelés : Grande-Terre en Guadeloupe, le Sud de la Martinique et Mayotte. Ces ouvrages

peuvent parfois servir également pour la production électrique. Ils peuvent être construits soit sur des cours d'eau pérennes (exemples de la retenue sur la Manzo à Ducos en Martinique ou des retenues de Combani et de Dzoumogné à Mayotte), soit sur des ravines non pérennes (exemple en Guadeloupe de l'ouvrage de ravine Dumanoir, alimenté par les prises de Carbet, Moreau et Pérou).

En complément, les cours d'eau sont ponctuellement aménagés avec des seuils construits et outillés pour la mesure du débit en rivière. Ces seuils sont équipés d'enregistreurs automatiques ou de simples règles pour la lecture directe de la hauteur d'eau. Compte tenu des épisodes de fort transport solide et de la largeur des lits de cours d'eau à La Guadeloupe, La Réunion ou La Martinique, ces seuils sont implantés sur de petits cours d'eau et/ou en tête de bassin. À Mayotte, en revanche, ils ont pu être implantés dès le cours aval ou moyen de certaines rivières (Dembéni, Koualé, Bounougoumouhé...). De faibles hauteurs (moins de 1 mètre), ces seuils peuvent cependant, au cas par cas, constituer des barrières partielles aux déplacements de la faune diadrome (barrière sélective pour certaines espèces selon les conditions hydrologiques).

Selon la spécificité des îles (nature géologique, pente des cours d'eau, hydrologie, transport solide...), on observe une typologie d'ouvrages assez différente d'une région à l'autre. Ainsi, on observe une forte similitude entre les ouvrages des Caraïbes (Guadeloupe / Martinique) alors que les ouvrages de La Réunion et de Mayotte sont nettement différents (Figure 5).

Comme en métropole, selon les caractéristiques physiques de l'ouvrage (géométrie : hauteur, profil, pente et longueur du coursier... ; nature des matériaux constructifs : béton, enrochements...), 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, les obstacles à la montaison seront soit :

■ **des chutes verticales ou quasi-verticales que les espèces ne peuvent franchir qu'en sautant ou en utilisant des capacités spécifiques (marche, ventousage, reptation).** Les déversements au-dessus des seuils à parement vertical ou quasi-vertical génèrent des nappes d'eau plongeantes pouvant empêcher tout franchissement des espèces non sauteuses voire des espèces sauteuses dès lors que la chute est supérieure à leur capacité de saut ou qu'elles ne possèdent pas d'autres capacités spécifiques de franchissement (marche, ventousage, reptation) ;

■ **des parements inclinés.** Le degré de franchissabilité d'un seuil incliné dépend alors des caractéristiques de l'écoulement sur le coursier (tirants d'eau, vitesses d'écoulement) et de la distance à franchir, qui doivent être mises en relation avec les capacités de franchissement des espèces ciblées (nage, endurance, ventousage, reptation, marche) et leurs caractéristiques morphologiques (hauteur du corps des individus) ;

■ **des configurations mixtes comportant une succession de parties en pente et de parties plus ou moins verticales (redans...).** Un redan 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.

La spécificité des cours d'eau, plus particulièrement la violence des crues et le fort charriage associé, notamment lors d'épisodes cycloniques, font que peu d'ouvrages sont équipés d'organes mobiles (vannes, clapets). Certains cours d'eau, moins soumis aux fortes crues, peuvent toutefois être équipés de seuils constitués d'organes mobiles mais cette typologie d'aménagement reste très anecdotique à l'échelle des départements d'outre-mer (Figure 6).

Les déversements sur les clapets génèrent généralement des chutes verticales ou quasi verticales.

Pour d'autres ouvrages, comme les vannages, le débit peut transiter soit par surverse (c.-à-d. au-dessus de la vanne), soit en sousverse (c.-à-d. 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 franchissement des espèces.



Figure 5



a, d, e, f © B. Voegtli (Ecogea)
 b © P. Valade (Ocea Consult)
 c © A. Dayde (Hydrétudes)

Exemples de seuils ou barrages présents sur les cours d'eau des départements insulaires ultramarins.
 (a) Retenue AEP de Dzoumogné (Mayotte), (b) Seuil d'irrigation de Bengalis sur la rivière du Mât (La Réunion), (c) Seuil de prise ILO de la rivière du Mât (La Réunion), (d) Seuil de stabilisation sur la Grand'Rivière (Martinique), (e) Seuil de prise EDF sur la rivière Bananier (Guadeloupe), (f) Seuil hydrométrique (Martinique).

Figure 6



© B. Voegtli (Ecogea)

Exemple d'un seuil constitué d'organes mobiles.

Clapet mobile de la rivière Kwalé (Mayotte).

Les ouvrages routiers

Les ouvrages routiers sont les obstacles les plus fréquemment observés sur les cours d'eau des îles d'outre-mer. Ils sont fréquents sur les parties basses des cours d'eau, en lien avec les zones les plus aménagées et les plus peuplées.

Dans la majorité des cas (Antilles, Mayotte), les ouvrages routiers rencontrés sont des **passages à gué**, c'est à dire que le franchissement du cours d'eau s'effectue par une chaussée immergée. Le fond du lit peut être naturel ou constitué d'un radier construit (enrochement, béton...). Lorsqu'ils sont ennoyés par l'aval, les passages à gués ne constituent généralement pas des obstacles pour les espèces diadromes. En revanche, et dans la majorité des cas, **lorsque ces passages sont volontairement calés plus hauts que le fond du lit, ils s'apparentent alors à des seuils**, et peuvent constituer des obstacles significatifs pour la faune aquatique (Figure 7).

Figure 7



a, d © P. Valade (Ocea Consult)
b, c © B. Voegtli (Ecogea)

Exemples de passages à gué s'apparentant à des seuils.

(a) Passage à gué sur la rivière Saint-Denis (La Réunion), (b) Passage à gué sur la rivière Case Navire (Martinique), (c) Passage à gué sur un affluent de l'Ourovéni (Mayotte), (d) Passage à gué avec redan sur la Rivière Blanche (Martinique).

Au niveau d'ouvrages routiers, le franchissement du cours d'eau peut également s'effectuer au moyen de passages busés ou de ponts-cadres (Figure 8). Comme les passages à gué, ils peuvent constituer des obstacles majeurs à la migration des espèces vers l'amont.



Figure 8



b, c, d © B. Voegtlté (Ecogea)
a © P. Valade (Ocea Consult')

Exemples de passages routiers.

(a) Passage routier de la rivière Saint-Louis (Guadeloupe), (b) Passage routier de la rivière des Écrevisses (Martinique), (c) Passage routier sur la rivière des Remparts (La Réunion), (d) Passage routier Beja (Mayotte).

Les principales causes limitant le franchissement des espèces de poissons et de macro-crustacés au niveau des passages hydrauliques (buses, dalots) sont les suivantes :

- des vitesses d'écoulement trop fortes à l'intérieur des aménagements ;
- une uniformité des vitesses excluant toute zone de repos : les individus doivent alors franchir l'ouvrage d'un seul trait ;
- des tirants d'eau trop faibles ;
- la présence d'une chute à l'aval immédiat de l'ouvrage ;
- l'absence de zones propices à l'escalade pour les *Gobiidae*, à la reptation pour les anguilles et à la marche pour les macro-crustacés.

Ces différents problèmes proviennent globalement d'un mauvais calage (altimétrie, pendage...) ou d'un mauvais dimensionnement de la section des passages. En effet, dès que la section hydraulique du (des) passage(s) est sous-estimée par rapport au débit à faire transiter, l'ouvrage peut se mettre en charge, ce qui entraîne alors des conditions de fortes vitesses d'écoulement, difficilement franchissables. À l'inverse, lorsque l'ouvrage est surdimensionné, le tirant d'eau peut devenir trop faible, rendant difficile la progression des espèces.

De plus, lorsque le tirant d'air du dispositif hydraulique (buse ou dalot) est trop faible, des débris sont susceptibles de se bloquer en entrée ou à l'intérieur de celui-ci, ce qui peut alors constituer une barrière physique et/ou provoquer une mise en vitesse des écoulements.

Enfin, l'obscurité générée par ce type d'ouvrages, notamment en journée le changement brusque d'intensité lumineuse à l'entrée de l'ouvrage, peut également provoquer chez certaines espèces une réticence à y pénétrer.

Les pêcheries de post-larves de Gobiidae

La pêche des jeunes gobies est répandue sur toute la ceinture tropicale indopacifique (Bell, 1999). En Martinique, en Guadeloupe et plus particulièrement à La Réunion, les post-larves de *Gobiidae Sicydiinae* font l'objet d'une pêche traditionnelle au niveau des embouchures. Il s'agit de la pêche des « pissettes » ou « Titiris » aux Caraïbes et des « bichiques » à La Réunion (Aboussouan, 1969 ; Schübel, 1998 ; Bell, 1999). Si ces pêcheries ciblent majoritairement les *Gobiidae*, des *Eleotridae* sont également observés dans les captures (Arda, 2012). Ces pêcheries sont saisonnières et rythmées sur les phases lunaires : du dernier quartier jusqu'à 2 ou 3 jours après la nouvelle lune.

À La Réunion, l'espèce majoritairement capturée pendant la saison chaude est le bouche-ronde *Sicyopterus lagocephalus* (bichique, bichique chaleur, bichique trois quart) et, dans une moindre mesure, davantage en saison fraîche, le bouche-ronde *Cotilopus acutipinnis* (bichique fine ou sans culotte). Cette pêche est pratiquée en mer et en rivière. Fortement ancrée dans le patrimoine de La Réunion, elle constitue également une valeur socio-économique importante qui attise l'intérêt (prix de vente au consommateur entre 30 et 70 euros par kilogramme ces dernières années) bien que cette pêche soit très aléatoire.

En mer, des pêcheurs nomades suivent la formation de bancs de post-larves sur la côte. Lorsqu'un banc de bichiques est repéré, ils capturent les poissons à l'aide de filets moustiquaires. Cette technique de pêche est essentiellement pratiquée pendant les lunaisons des derniers mois de l'année (octobre à décembre) et vise le bouche-ronde *Sicyopterus lagocephalus*. Elle s'est développée au cours de la seconde moitié du XX^e siècle.

En rivière, les pêcheurs capturent les bichiques avec des vouves (nasses) disposées dans des canaux (Figure 9). Ces canaux sont soit des chenaux dans lesquels l'eau est dirigée depuis le lit naturel (rivières à larges deltas), soit des structures en galets divisant la largeur mouillée du chenal en différents canaux de pêche (rivières à plan d'eau d'embouchure). Cette pêche est pratiquée tout au long de l'année, sauf pendant la nouvelle lune de mars (préfet de La Réunion, 2008a, 2008b). La gestion de ces pêcheries est une action prioritaire du Sdage 2016-2021 à La Réunion, avec le double objectif de restaurer la qualité des peuplements piscicoles en rivière tout en maintenant et en organisant cette activité originale et patrimoniale : mise en place d'actions pilotes de régulation de la pression de pêche, fédérer les pêcheurs à l'échelle de l'île etc.

Figure 9



Exemples d'aménagements pour pratiquer la pêche aux *Gobiidae* à La Réunion
(a) Ensemble d'embouchure aménagée de canaux dédiés à la pêche du bichique sur une rivière à plan d'eau d'embouchure (rivière des Roches), (b) Exemple d'un canal pêché avec des vouves en fibres naturelles sur un cours d'eau à large delta (rivière Saint-Étienne).

a © P. Valade (Ocea Consult)
b © B. Voegtli (Ecogea)

Aux Caraïbes, cette pêche est moins documentée mais n'en reste pas moins traditionnelle et à forte valeur patrimoniale (Morandi et al., 2015). Ce sont les post-larves et les juvéniles des colle-roche (*Sicydium punctatum* et *Sicydium plumieri / antillarum*) qui sont ciblés. Les poissons sont capturés au filet moustiquaire (ou tissu) à



l'embouchure des rivières, de juillet à décembre. Cette pêche ne fait pas l'objet d'aménagements particuliers. Elle est pratiquée comme un revenu complémentaire. En Martinique, cette pratique se poursuit malgré l'arrêté d'interdiction de pêche en vigueur dans les rivières (préfet de La Martinique, 2014).

■ Barrières impactant la dévalaison

Les ouvrages (avec ou sans prélèvement d'eau) peuvent constituer des obstacles sérieux à la migration de dévalaison des œufs, larves, juvéniles ou adultes. Les sources principales de retard, blessures ou mortalité sont l'arrivée et l'arrêt plus ou moins long dans une retenue, le transit par les déversoirs et les turbines hydroélectriques, l'entraînement dans les prises d'eau.

Pour les espèces anadromes (macro-crustacés indigènes, poissons *Gobiidae*, *Eleotridae*...), la dévalaison se fait au stade larvaire dénommé « embryon-libre » (Delacroix et Champeau, 1992 ; McDowall, 2007 ; Maeda *et al.*, 2008 ; Bell, 2009 ; Valade *et al.*, 2009 ; Teichert *et al.*, 2013 ; Ellien *et al.*, 2014). À noter toutefois que, pour certains macro-crustacés (*Macrobrachium sp.*), la dévalaison pourrait être réalisée à la fois par des adultes et des larves, mais ces comportements semblent réservés aux grands cours d'eau continentaux, au sein desquels les espèces sont présentes jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de l'océan (Bauer et Delahoussaye, 2008 ; Bauer, 2011).

Pour les espèces catadromes (*Anguillidae*, *Kuhliidae*), ce sont les adultes mûres qui dévalent en mer pour s'y reproduire (Hogan et Nicholson, 1987 ; Robinet et Feunteun, 2002 ; Sugeha *et al.*, 2006 ; Wouthuyzen *et al.*, 2009 ; Feutry *et al.*, 2012b).

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

Le passage par les déversoirs, évacuateurs de crues ou chutes naturelles (Figure 10) peut entraîner des mortalités directes (blessures, chocs...) ou indirectes (sensibilité à la prédation sur des individus choqués et/ou

Figure 10



a, d © P. Valade (Ocea Consult)
b, c © B. Voegtli (Ecogea)

Exemples de passages à franchir au niveau de déversoirs ou de chutes naturelles.

(a) Chute naturelle (La Réunion), (b) Chute verticale sur déversoir de barrage (La Réunion), (c) Déversement sur coursier de barrage (Mayotte), (d) Déversement sur coursier (Martinique).

désorientés en arrivant à l'aval). Les études disponibles, menées 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 d'ouvrage, de possibilités de chocs sur des radiers, des rochers...(Bell et Delacy, 1972 ; Ruggles, 1980 ; Ruggles et Murray, 1983).

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

■ **en chute libre.** Les individus chutent en dehors de la lame d'eau et atteignent, à partir d'une certaine hauteur de chute, une vitesse limite fonction notamment de leur taille et de leur morphologie. Des expérimentations ont montré clairement que des dommages significatifs apparaissent sur les poissons dès lors que leur vitesse d'impact sur le plan d'eau dépasse 15-16 m/s, quelle que soit la taille de l'individu (Bell et Delacy, 1972 ; Larinier et Travade, 2002). Ainsi, et à condition qu'une fosse de réception soit présente et de profondeur suffisante, les poissons de taille inférieure à 10-15 cm ne subissent globalement aucun dommage, quelle que soit la hauteur de chute, car cette vitesse critique n'est jamais atteinte. Pour les poissons de taille plus conséquente, les dommages restent minimes tant que la chute est inférieure à 30 m pour des poissons de l'ordre de 15-20 cm et tant que la chute est inférieure à une douzaine de mètres pour les individus de taille supérieure à 60 cm ;

■ **dans la lame d'eau.** Les poissons dévalants restent confinés dans la lame d'eau, et leur survie peut être comparée à celle résultant d'une chute libre induisant la même vitesse d'impact au niveau du plan d'eau, à condition que la fosse de réception en pied assure un matelas d'eau suffisant (c.-à-d. que le jet n'entraîne pas le poisson jusqu'au fond). La vitesse d'impact V (en m/s) peut s'apprécier globalement par la formule suivante : $V = (2 \times 9,81 \times DH)^{0,5}$ où DH (en m) correspond à la hauteur de chute. Une lame d'eau atteint une vitesse critique de l'ordre de 16 m/s à partir de 13 m de chute environ. Au-delà de cette hauteur de chute, les dommages sur les poissons deviennent significatifs. Les mortalités augmentent rapidement jusqu'à être totales pour environ une cinquantaine de mètres de chute (c.-à-d. vitesse d'impact de l'ordre de 30 m/s) (Voegtli, *com. pers.*). Ainsi, pour les petits individus (alevins, poissons de taille inférieure à 15-20 cm), il est préférable de tomber en chute libre. Pour les plus grands individus, les effets seront très proches que la chute se fasse dans ou en dehors de la lame d'eau (blessures significatives à partir de 12 à 13 m de chute environ).

Entraînement dans les prises d'eau

Les prises d'eau peuvent être liées à différents usages comme l'alimentation en eau potable, l'irrigation, la production piscicole (étang, pisciculture) ou la production d'électricité (centrale hydroélectrique).

Du fait de leur comportement migratoire les incitant à suivre le courant principal, les migrateurs en dévalaison 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 11).

Très fréquemment dans les départements d'outre-mer, l'eau prélevée n'est pas restituée au cours d'eau (irrigation, eau potable notamment) et les dommages sur la faune dévalante varient alors fortement selon les débits prélevés et les possibilités de retour des individus vers le cours d'eau.

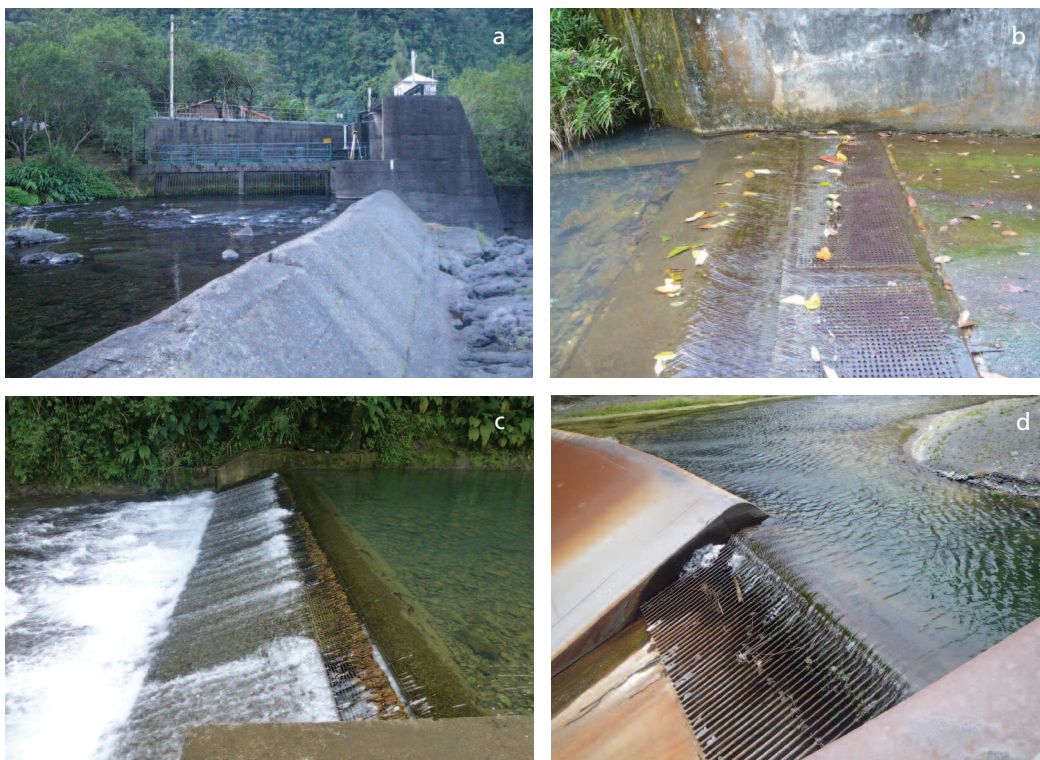
Dans le cas des centrales hydroélectriques, l'eau prélevée est turbinée, puis restituée au cours d'eau. Cependant, le passage à travers les turbines hydrauliques soumet les individus dévalants à diverses contraintes susceptibles d'entraîner des dommages importants : risques de chocs contre les parties 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 ; Gomes et Larinier, 2008). En outre-mer, les équipements turbinent souvent l'eau sous haute chute, les taux de mortalité pourraient se révéler importants mais dépendants des caractéristiques et des



conditions de gestion de l'ouvrage (Lagarde, 2016). L'estimation de la mortalité des larves au passage d'un équipement hydroélectrique pourra être mesurée, au cas par cas, à partir d'un suivi comparé du taux d'échappement des larves transitant par l'ouvrage et des larves en dévalaison dans le cours d'eau naturel.

Figure 11



a, b, d © B. Voegtli (Ecogea)
c © P. Valade (Ocea Consult)

Exemples de prises d'eau liées à différents usages : (a) Prise EDF sur la rivière Langevin (La Réunion) - production d'électricité, (b) Prise AEP sur la rivière Moustique (Guadeloupe), (c) Prise AEP (Guadeloupe) - alimentation en eau potable, (d) Prise pour irrigation (La Réunion) - alimentation pour l'irrigation.

Décantation dans les retenues ou bassins de décantation

La présence d'un barrage ou d'un bassin de décantation en tête de prise d'eau entraîne une réduction de la vitesse de l'écoulement (Figure 12 page 30), bloquant en partie la charge sédimentaire. Ce ralentissement des écoulements peut ralentir (voire stopper) les individus qui utilisent le flux d'eau lors de leur migration de dévalaison. Cela peut être préjudiciable à leur survie, notamment pour ceux qui doivent regagner la mer dans un délai très court.

En effet, les larves de poissons et de crustacés amphidromes (tailles inférieures à 2 mm) ont un comportement de nage ascendante uniquement (pas de déplacement horizontal), qui leur permet de se maintenir dans la colonne d'eau et leur évite de sédimenter (Balon et Bruton, 1994 ; Valade *et al.*, 2009). L'absence de courant longitudinal, dans certaines retenues et surtout dans les bassins de décantation des ouvrages de prises d'eau, provoque *in fine* une décantation et une mortalité des larves (Valade *et al.*, 2004 ; Antea *et al.*, 2011).

Figure 12



Exemples de ralentissement des écoulements provoqué par certains ouvrages, pouvant impacter la dévalaison suite à une décantation des individus dévalants.

(a) Bassin de décantation en tête de prise d'eau (La Réunion), (b) Retenue de Dzoumogné (Mayotte).

a © P. Valade (Ocea Consult)
b © B. Voegtli (Ecogea)

Principaux impacts d'un obstacle au déplacement sur les communautés de poissons et de macro-crustacés

Les obstacles physiques (chute et barrage, turbine hydroélectrique, zone de vitesse de courant excessive ou au contraire ralentie avec augmentation de la profondeur d'eau, absence ou manque d'eau) présents sur un cours d'eau peuvent perturber de manière plus ou moins importante le bon déroulement des déplacements des espèces aquatiques et limiter ainsi leur colonisation d'habitats favorables à la croissance ou leur accès aux zones de reproduction. Ces mécanismes ont été largement décrits dans les systèmes fluviaux tempérés. Compte tenu du caractère diadrome de l'ensemble des espèces de poissons et de crustacés décapodes indigènes, l'impact des barrières est exacerbé dans le contexte des cours d'eau des milieux insulaires d'outre-mer (March *et al.*, 2003 ; McDowall, 2007 ; Bell, 2009 ; Bauer, 2011).

■ Effets démographiques directs

Les barrières induisent des effets directs sur la démographie des espèces par la modification de certains habitats favorables (par exemple, par ennoïement) et la limitation des accès aux aires de reproduction, de développement et d'alimentation des populations. Le confinement des individus en aval des barrières peut créer des phénomènes de surdensités, favorables à une prédation plus importante, une croissance et des facteurs de conditions plus faibles, ce qui a globalement pour effet de diminuer les capacités de reproduction des populations concernées. Ces confinements sont d'autant plus marqués s'agissant de barrières de type prise d'eau, à l'aval desquelles les diversités et quantités d'habitats disponibles seront altérées.

Des effets positifs (exemple : limitation du nombre de prédateurs) pour certaines espèces dotées de fortes capacités de franchissement pourront être observés en amont de barrières, pour les crustacés en particulier (Covich *et al.*, 2009). Cet effet doit toutefois être considéré avec prudence car, dans le cas de prises d'eau, les pertes d'individus associées à la dévalaison peuvent être très importantes et induire pour la population un gain net de fitness très faible, voire nul.

■ Effets phénotypiques

Le blocage ou le retard à la migration des espèces vers leurs zones de reproduction peut avoir des conséquences à l'échelle individuelle. Par exemple, il a été montré qu'un seuil d'une dizaine de mètres pouvait



opérer une sélection morphologique pour les juvéniles de *Cotylopus acutipinnis*, alors que ce seuil ne produisait pas cette sélection chez l'autre espèce de bouche-ronde *Sicyopterus lagocephalus* (Lagarde, 2018).

Les obstacles qui impactent à la fois la montaison et la dévalaison pourront alors induire une double sélection :

- une première sélection à la montaison en faveur des individus dotés des plus fortes capacités de franchissement (bonne condition physiologique, taille et morphologie adaptées...);
- une seconde sélection négative sur la progéniture de ces mêmes individus suite aux pertes d'individus lors de la dévalaison.

À l'échelle d'un bassin versant, la sélection s'opérera également sur le succès reproducteur des individus qui n'auront pas pu franchir l'obstacle au travers de la qualité et de la fonctionnalité des habitats en aval de l'obstacle (attention notamment au débit réservé).

In fine, la présence d'obstacle(s) pourra créer un déséquilibre au sein d'une population de poissons ou de macro-crustacés en favorisant certains phénotypes par rapport à d'autres.

■ Retards à la migration et mortalités par épuisement

Sur les espèces des milieux tempérés, l'impact cumulé des ouvrages sur les axes très fragmentés peut s'avérer conséquent et ce même si aucun obstacle majeur n'est identifié (Chanseau *et al.*, 1999 ; Ovidio et Philippart, 2002 ; Thorstad *et al.*, 2005).

Les pertes induites par une succession d'ouvrages sont liées non seulement au nombre d'individus qui ne parviennent pas à franchir l'ensemble des obstacles situés en aval des premières frayères mais aussi à l'épuisement et au cumul des délais liés à leur franchissement (tentatives de franchissement infructueuses, recherche active de voies de passages...). Ainsi, à la montaison, même si un certain nombre d'individus 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 lui empêche de défendre un territoire ou d'éviter les prédateurs.

Pour les espèces des milieux insulaires tropicaux, peu de données existent sur ces points spécifiques.

■ Blessures et mortalités au niveau des ouvrages

Des blessures ou des mortalités de poissons peuvent survenir au droit d'ouvrages lors des migrations de montaison (chocs suite à des sauts, ...), mais ce type d'impact concerne plus spécifiquement la migration de dévalaison, au niveau d'ouvrages de prise d'eau.

Au niveau d'un ouvrage présentant une prise d'eau, une partie des individus dévalants 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 prélevée du débit total du cours d'eau.

De manière générale, la dévalaison des individus transitant 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).

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

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 ; Gomes et Larinier, 2008 ; Voegtli et Larinier, 2008 ; Voegtli, 2010a, 2010b, 2014 ; Thinus et Guillot, 2016) et dépendent en particulier du débit d'équipement des ouvrages, de leur configuration et des caractéristiques des turbines.

■ Augmentation des risques de prédation et de maladies

En augmentant le temps de résidence et en concentrant les poissons et macro-crustacés dans certains secteurs et/ou en provoquant leur épuisement lors de tentatives de franchissement successives, les obstacles sont susceptibles de favoriser la prédation par l'avifaune, les poissons piscivores et le braconnage.

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

De même, lors de la migration de dévalaison, les individus 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.

■ Autres effets

Les problèmes de franchissement peuvent également engendrer des déséquilibres biologiques et impacter le fonctionnement général des écosystèmes.

En effet, les cours d'eau des îles tropicales volcaniques présentent globalement une faible richesse spécifique. Aussi, les poissons brouteurs comme les *Gobiidae Sicydiinae* assurent une part importante de la transformation d'énergie disponible en consommant le périphyton. Ces espèces, de par leurs arrivées massives aux embouchures, constituent également des intrants significatifs de matière organique, importants pour le fonctionnement écologique des cours d'eau. Ils permettent d'une part le développement des poissons carnassiers / opportunistes (*Eleotridae*, *Anguillidae*, *Kuhliidae*), mais aussi, en bout de chaîne alimentaire, des espèces détritivores (macro-crustacés). Dans ce contexte, les obstacles à la continuité de la rivière pour ces espèces et les pêcheries en particulier peuvent causer un déséquilibre plus global dans les peuplements des cours d'eau.

L'absence ou la baisse de densité de poissons brouteurs comme les *Gobiidae Sicydiinae* peut également entraîner une prolifération d'algues filamenteuses. Ces proliférations entraînent alors une diminution de la capacité d'accueil pour l'ensemble de la faune aquatique (poissons, invertébrés) et peut causer, localement, des gênes pour les usages de l'eau : charges organiques dans les prélèvements d'eau, qualité pour la baignade (Valade, *com. pers.*).





Les capacités de franchissement des poissons et des macro-crustacés

Les différents modes de franchissement

Au cours de leur migration de montaison, les poissons et macro-crustacés rencontrent des obstacles physiques, artificiels ou naturels, dont le franchissement est plus ou moins facile.

Les possibilités de franchissement d'un obstacle sont étroitement liées :

- aux comportements migratoires et aux capacités de franchissement associées des espèces considérées ;
- à la configuration de l'obstacle et aux caractéristiques hydrauliques au niveau de celui-ci.

Les capacités de franchissement des espèces sont fortement liées à leur morphologie et à leurs capacités biomécaniques, elles-mêmes fortement conditionnées par l'écologie de l'espèce considérée (ex. : espèces benthiques vs pélagiques) et par les types de milieux dans lesquels elles vivent ou transitent au cours de leur cycle biologique (ex. : espèces ou stades rhéophiles vs limnophiles). D'autres facteurs, tels que la température de l'eau ou l'état physiologique des poissons, ont également une influence sur les capacités de franchissement d'un individu donné, mais ne seront pas abordés ici par souci de simplification.

Dans les milieux insulaires d'outre-mer, peu d'espèces de poissons ont des capacités développées de saut ou de sprint, leur permettant potentiellement de franchir certains obstacles. Les poissons et macro-crustacés de ces milieux sont surtout connus pour d'autres modes de franchissement, à la condition toutefois que le support soit humidifié : capacités de marche (macro-crustacés décapodes), de reptation (anguilles) ou de « grimpe » en utilisant leurs nageoires pelviennes soudées en ventouse (*Gobiidae Sicydiinae*, voir chapitres dédiés aux capacités spécifiques de ventousage pour ces espèces).

C'est grâce à ces modes de déplacement particuliers que certaines espèces arrivent ponctuellement à coloniser des bassins versants fortement aménagés ou des zones de sources en amont de chutes naturelles de plusieurs mètres voire, exceptionnellement, plusieurs centaines de mètres.

Les activités de nage des poissons

■ Niveaux d'activités et 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 pour le poisson ;

- **l'activité de sprint ou de pointe**, qui 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 dizaines de minutes, mais qui entraîne 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 sprint.

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 la vitesse maximale de nage est, selon les auteurs, de l'ordre de 10 à 20 secondes (Beach, 1984 ; Zhou, 1982 ; Wardle, 1980 ; Videler, 1993 ; Castro-Santos, 2006).

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).

La **taille du poisson (Lp)** 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 en fonction de la longueur du poisson. 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 estimation fiable de la vitesse maximale de nage, basée sur des fondements objectifs.

$$U_{\max} = 0,4 + 7,4 Lp \quad \text{Formule proposée par Videler (1993)}$$

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

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

N.B. Dans le cadre de la méthode ICE adaptée aux départements insulaires d'outre-mer, et à défaut d'études expérimentales ciblées sur le franchissement, les vitesses maximales de nage U_{\max} des espèces concernées ont été déterminées à partir des formules de Videler (1993) données ci-dessus, ajustées à partir d'observations visuelles de poissons menées lors de franchissements d'obstacles *in situ*.

Le tableau 5 présente les classes de tailles retenues pour différents stades ontogéniques des espèces de poissons considérées dans ce document (adultes / subadultes, juvéniles, stades propres à l'anguille).

La gamme de taille (Lp_{\min} – Lp_{\max} , qui représentent respectivement les tailles minimale et maximale retenues) a été définie à partir notamment des données des atlas des poissons d'eau douce de La Martinique (Lim *et al.*, 2002), de La Guadeloupe (Monti *et al.*, 2010), de La Réunion (Keith *et al.*, 2006), des Comores, Mascareignes et Seychelles (Keith *et al.*, 2006), et du rapport de synthèse sur les poissons migrateurs amphihalins du Museum national d'histoire naturelle (Tabouret, 2012).

Lp_{moy} représente la moyenne des deux valeurs extrêmes Lp_{\min} et Lp_{\max} .



Tableau 5 Critères de taille retenus pour les différentes espèces considérées

Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom				Stade biologique	Taille des individus (mm)						
			Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion		Lp min	Lp moy	Lp max				
Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Civelle	50	75	100				
	<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolor (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X								
	<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Anguille jaune à adulte	100	1000 (A. marmorata) 500 (autres espèces)	2000 (A. marmorata) 1000 (autres espèces)				
	<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X								
	<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X										
Eleotridae	<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X	Juvénile	15	30	40				
	<i>Dormitator maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nèg, dormeur (C)	X	X										
	<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X											
	<i>Eleotris klunzingerii</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X								
	<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X								
	<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X										
	<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X										
	<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X										
	<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X	Subadulte / Adulte	40	100	150				
	<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)			X									
<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)			X										
Gobiesocidae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	X	X			Juvénile	15	30	40				
		Subadulte / Adulte					40	100	150					
Gobiidae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X			Juvénile	15	30	40				
	<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X								
	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X								
	<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X									
	<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X										
	<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X									
	<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X								
	<i>Glossogobius kokius</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X								
	<i>Mugilogobius mertoni</i>	Gobi millet (C)			X									
	<i>Redigobius balteatus</i>	Gobie drapeau (F)			X									
	<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobi tase (C)			X									
	<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X							Subadulte / Adulte	40	100	150
	<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X										
	<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot à bec de lièvre, cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)			X	X								
<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X									
Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlité des rochers (F) /			X	X	Juvénile	20	60	100				
	<i>Kuhlia sauvagii</i>	doule de roche, carpe (C)			X	X	Subadulte / Adulte	100	300	400				
Mugilidae	<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)			X		Juvénile	25	65	100				
	<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F)	X	X			Subadulte / Adulte	100	200	300				
	<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X								

■ Tirant d'eau minimum

Il est nécessaire que le tirant d'eau soit suffisant pour permettre au poisson d'utiliser ses pleines capacités de nage, en assurant 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, varient d'environ 0,10 (*Gobiidae*) à près de 0,30 (*Kuhliidae*).

Dans la littérature (Larinier *et al.*, 1994 ; FAO et DVWK, 2002 ; DWA, 2006), il est souvent mentionné une lame d'eau minimale comprise entre 1 à 2 fois la hauteur du poisson pour assurer la nage. Il est parfois préconisé jusqu'à 2,5 fois la hauteur de la nageoire caudale, notamment lors du dimensionnement de passes à poissons.

N.B. Dans le cadre de la méthode ICE adaptée aux départements insulaires d'outre-mer, il a été considéré que le tirant d'eau minimal nécessaire pour permettre aux individus de nager était voisin de 1,5 fois la hauteur « moyenne » (h_{pmoy}) 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 estimé de chaque espèce (Figure 13).

Figure 13

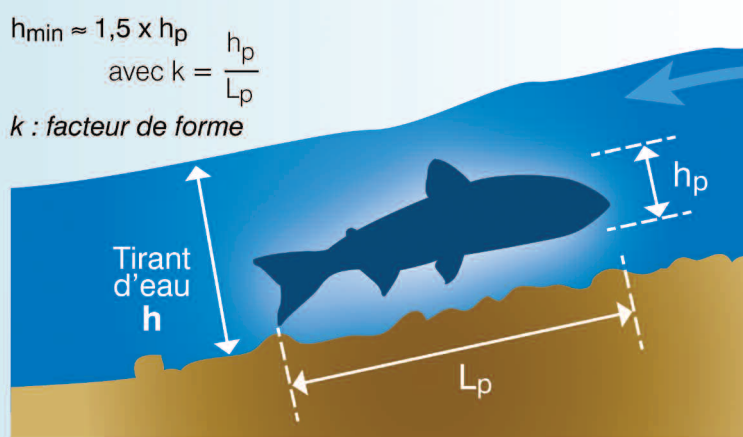


Schéma représentant le tirant d'eau minimum (h_{min}) considéré comme nécessaire pour qu'un poisson puisse nager convenablement. Adapté de Baudoin *et al.*, 2014.

Attention. À noter que les valeurs retenues pour les tirants d'eau sont à prendre comme des valeurs extrêmes permettant le franchissement potentiel d'un obstacle par la nage. Dans les passes à poissons, où l'on cherche à maximiser le franchissement, des valeurs nettement plus importantes sont systématiquement adoptées (2 à 2,5 fois la hauteur des individus).



Le franchissement par saut des poissons

■ Capacités de saut

Les *Mugilidae* (*Agonostomus monticola*, *Agonostomus telfairii*, *Agonostomus catalai*) utilisent fréquemment leurs capacités de saut pour franchir un obstacle (Figure 14).

D'autres espèces (ex. : celles de la famille des *Kuhliidae*) ont des facultés à sauter mais ce comportement reste toutefois théorique et n'a jamais été observé dans le cas du franchissement d'un obstacle.

Figure 14



Juveniles de mulets (*Agonostomus*) tentant de franchir par saut le passage à gué de la ravine chaude (Grande Rivière à Goyaves, Guadeloupe).

(a) Juveniles au pied de l'obstacle, (b) Poissons tentant de franchir l'obstacle par saut.

a © P. Valade (Ocea Consult'
b © B. Voegtli (Ecogea)

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 :

$$\begin{aligned} X &= (U_{\max} \cos \beta) t \\ Y &= (U_{\max} \sin \beta) t - 0,5 g t^2 \end{aligned}$$

où :

X et Y sont les distances horizontales et verticales parcourues par le projectile (en l'occurrence le poisson) au temps t ;

U_{\max} est la vitesse initiale, assimilée ici à la vitesse de sprint du poisson ;

β est l'angle d'incidence avec le plan horizontal ;

g est l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s²).

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 :

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

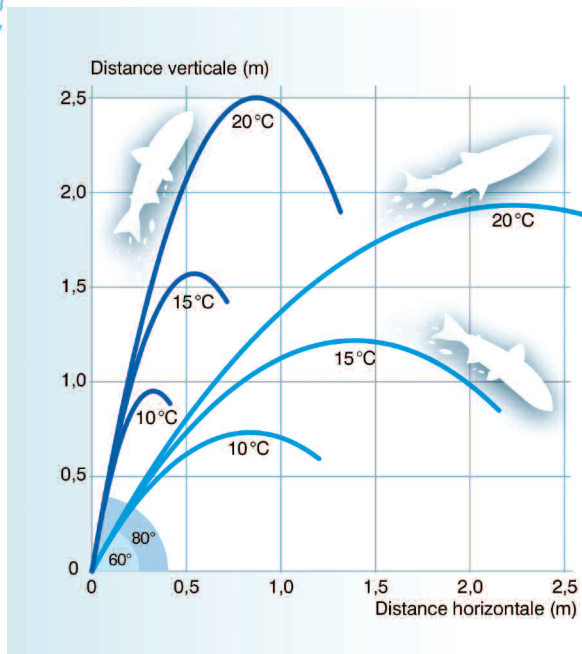
Les trajectoires théoriques de saut d'un saumon de 0,8 m de longueur ont été représentées en fonction de la température de l'eau et de l'angle d'incidence du saut (Figure 15 page 38). Ce graphique met en évidence le rôle prépondérant de la température et de l'angle d'incidence sur la hauteur franchissable par un poisson qui saute.

En toute rigueur, il conviendrait d'ajouter à cette hauteur de saut 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 de l'eau existant au pied d'une chute, dont le poisson peut profiter. Les valeurs de saut obtenues par les formules présentées ci-dessus sont donc des valeurs minimales.

À titre d'exemple, le tableau 6 page 38 présente l'évolution théorique de la hauteur de saut d'un poisson d'une longueur donnée en fonction de différents paramètres.

Figure 15



Trajectoires théoriques de saut pour un saumon de 0,8 m de longueur en fonction de la température de l'eau et de l'angle d'incidence avec l'horizontale au début du saut. D'après Larinier et al., 2002 et modifié par Baudoin et al., 2014.

Tableau 6

Évolution théorique de la hauteur de saut d'un poisson d'une longueur donnée et de sa vitesse initiale U_{max} 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 associée du poisson (L_p) 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°
7,00	0,90	2,4	1,9	1,0	2,9	2,3	1,5	3,3	2,8	1,9
6,50	0,80	2,1	1,6	0,9	2,5	2,0	1,3	2,9	2,4	1,7
6,00	0,75	1,8	1,4	0,8	2,2	1,8	1,1	2,5	2,1	1,5
5,50	0,70	1,5	1,2	0,6	1,8	1,5	1,0	2,2	1,8	1,3
5,00	0,60	1,2	1,0	0,5	1,5	1,3	0,8	1,9	1,6	1,1
4,50	0,55	1,0	0,8	0,4	1,3	1,1	0,7	1,6	1,3	1,0
4,00	0,50	0,8	0,6	0,3	1,0	0,9	0,6	1,3	1,1	0,8
3,50	0,40	0,6	0,5	0,3	0,8	0,7	0,5	1,0	0,9	0,7
3,00	0,35	0,4	0,3	0,2	0,6	0,5	0,4	0,8	0,7	0,5
2,50	0,30	0,3	0,2	0,1	0,5	0,4	0,3	0,6	0,5	0,4
2,00	0,20	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,3
1,50	0,15	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2
1,00	0,10	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
0,75	0,05	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1



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

NB Dans le cadre de la méthode ICE adaptée aux départements insulaires d'outre-mer, il a été globalement retenu, pour les poissons, une incidence de saut de 60° et une hauteur de saut équivalente à $Y_{\max} + L_p / 2$. La valeur de saut Y_{\max} est estimée à partir de données et observations collectées *in situ* ou, à défaut, calculée à partir de la formule proposée par Videler (1993) présentée précédemment et basée sur la taille des poissons.

■ Charge minimale sur l'obstacle

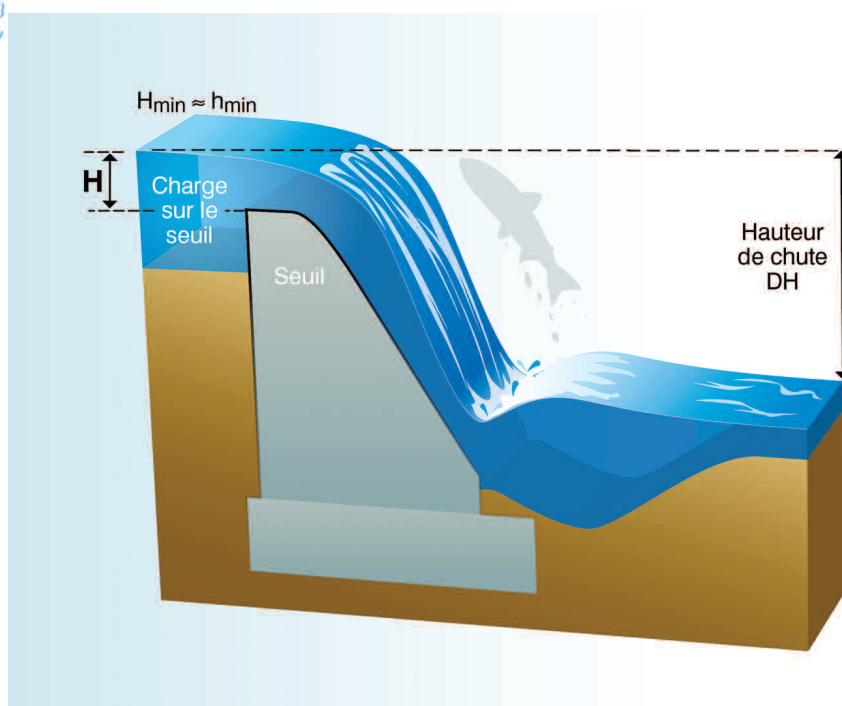
Pour le franchissement par saut, il est nécessaire que la lame d'eau sur le déversoir (seuil, chute naturelle) soit suffisante pour permettre au poisson de reprendre une nage efficace dès sa réception. Ceci est particulièrement essentiel lorsque la chute est importante et que le poisson a de fortes chances de retomber sur la crête de l'ouvrage.

Pour les petites chutes, bien inférieures aux capacités de saut des poissons, la distance horizontale parcourue lors du saut permet généralement au poisson 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 efficace.

NB Dans le cadre de la méthode ICE adaptée aux départements insulaires d'outre-mer, il a été considéré que la charge minimale sur l'obstacle (H_{\min}), nécessaire à un franchissement par saut, était équivalente à la profondeur d'eau minimale (h_{\min}) permettant la nage du poisson (Figure 16).

Attention. À noter que ces valeurs sont à prendre comme des valeurs extrêmes permettant un franchissement potentiel. C'est pourquoi, dans les passes à poissons, où l'on cherche à maximiser le franchissement, des valeurs nettement plus importantes sont systématiquement adoptées.

Figure 16



Charge minimale (H_{\min}) sur un obstacle, permettant une bonne réception et la reprise d'une nage efficace suite à un franchissement par saut (h_{\min} représente le tirant d'eau minimum nécessaire pour la nage, présenté en Figure 13). D'après Baudoin *et al.*, 2014.

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 17b, d).

Au pied d'un obstacle, si le substratum est suffisamment meuble, l'impact du jet sur celui-ci crée une fosse où se dissipe l'énergie produite par la chute. Cette énergie varie en fonction du 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 :

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

À débit unitaire et à chute équivalents, la profondeur de fosse augmente avec la pente, et est maximale pour une chute verticale ou subverticale.

En revanche, 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 17a, c).

Figure 17



a, c © P. Valade (Ocea Consult)
b, d © B. Voegtli (Ecogea)

Exemples de fosses en aval d'ouvrages. (a) Fosse insuffisante, (b) Fosse suffisante, (c) Fosse insuffisante, (d) Fosse suffisante.

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 de l'individu et à la manière dont se dissipe le jet à l'aval de la chute.

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



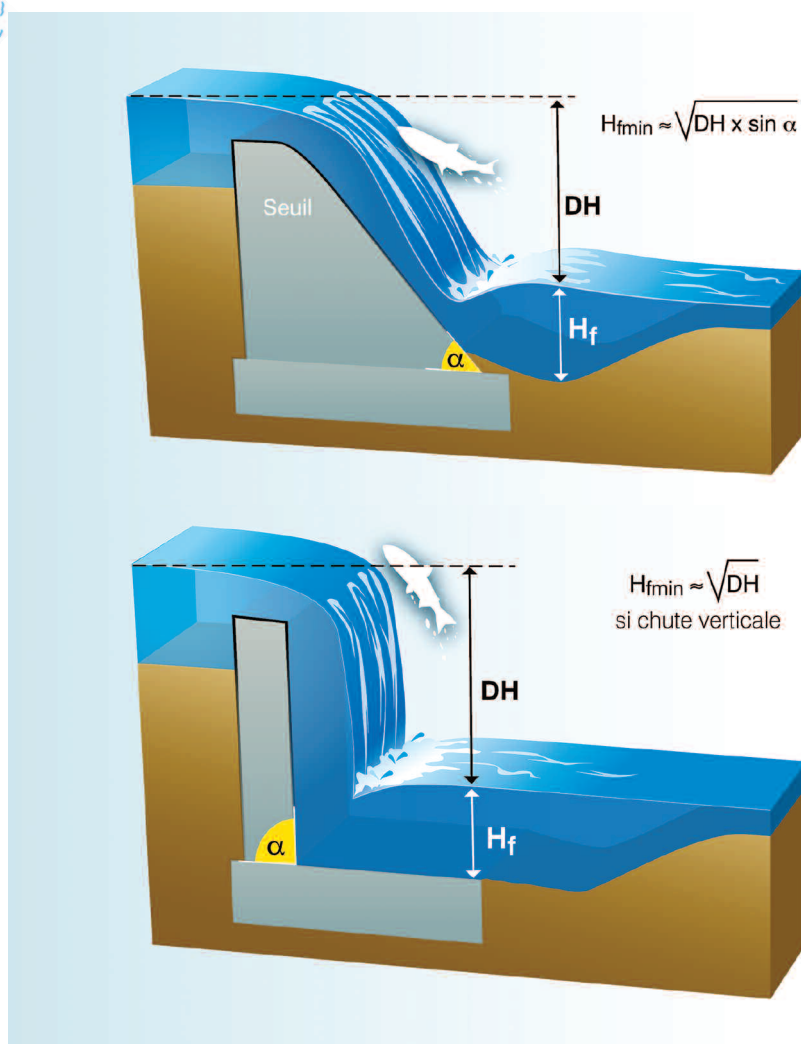
la fosse correspondant à 1 à 2 fois la longueur du corps (Meixler *et al.*, 2009). Ce critère n'intègre pas de notion d'hydraulique et de dissipation d'énergie de la chute. Ainsi, quelles que soient la longueur du poisson et la hauteur de chute, la profondeur minimale de fosse nécessaire reste la même. Ce critère tend à proposer des valeurs minimales de profondeur de fosses beaucoup trop importantes pour les petites chutes. À titre d'exemple, si le critère retenu est de prendre 2 fois la longueur du poisson, un poisson de 75 cm aurait besoin d'une fosse 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 (Stuart, 1962 ; Lauritzen *et al.*, 2010). Ne prenant en compte ni le débit unitaire, ni l'incidence du jet, ces critères ont par contre tendance à donner des valeurs de profondeurs de fosse nécessaires beaucoup trop importantes pour des chutes supérieures à 1 m (entre 1,5 et 3 mètres pour une chute de 1,5 mètres).

NB Dans le cas de la méthode 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 18) comme les formules de Veronese (1937) et Fahlbusch (1994) tout en excluant volontairement le débit unitaire, élément trop difficile à intégrer dans la démarche :

$$H_f \geq \sqrt{DH \sin \alpha}$$

Figure 18



Ordre de grandeur de la profondeur minimum de fosse d'appel (H_{fmin}) nécessaire pour permettre au poisson de franchir un obstacle (par saut ou par nage) dans des conditions satisfaisantes. D'après Baudoin *et al.*, 2014.

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 prendre un appel suffisant lui permettant de franchir l'ouvrage par saut ou par nage.

D'autre part, la profondeur de fosse utile doit être suffisamment proche de la chute, notamment lorsque le poisson doit faire appel à ses capacités de saut. En effet, les observations visuelles de tentatives de franchissement par saut par des poissons montrent que la majorité de celles-ci se situent à proximité du point de contact de la chute avec le plan d'eau aval.

N.B Aussi, dans le cadre de la méthode ICE, il a été considéré 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 menés par Lauritzen *et al.* (2005).

Les capacités spécifiques de reptation des anguilles

En raison de leur morphologie et de leur mode de propulsion, les performances natatoires des anguilles sont plus limitées que celles des autres espèces de la même taille, notamment en ce qui concerne les vitesses maximales de nage.

Pour les civelles (juvéniles de 6-8 cm environ), les vitesses de nage maximales proposées dans la littérature sont de l'ordre de 30-50 cm/s (Tsukamoto *et al.*, 1975 ; Clough et Turnpenny, 2001). Pour les anguillettes d'une vingtaine de centimètres et les anguilles jaunes, elles sont de l'ordre de 1 à 1,5 m/s (Sörenson, 1951 ; Blaxter et Dixon, 1959 ; Clough *et al.*, 2002).

McLeave (1980) a étudié les performances des civelles d'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) : la distance parcourue contre un écoulement de 0,30 m/s est voisine de 3 mètres et se réduit à moins de 50 cm contre un courant de 0,5 m/s.

Cependant, de par leur morphologie particulière et leurs capacités de respiration cutanée, les anguilles sont capables de se déplacer également par reptation (Figure 19), à la condition toutefois que le support reste humidifié. C'est par ce mode de déplacement que ces espèces parviennent à contourner certains obstacles naturels et artificiels, et à coloniser certaines retenues.

Les plus petits individus sont capables de franchir « par escalade » des parois verticales sans prendre d'appuis particuliers. Ils utilisent notamment la force de tension superficielle créée entre leur corps et la paroi humide pour se maintenir à la verticale (Legault, 1986, 1987 ; Lagarde *et al.*, 2016). Cependant, au cours de la croissance, le rapport poids / tension superficielle (proportionnel à la longueur du corps) 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 (Figure 19a).

Nature, pente et alimentation (charge) du substrat de reptation, en relation avec la taille des anguilles, sont des facteurs essentiels et souvent liés, déterminant les possibilités de franchissement de ces espèces. Pour que la reptation soit performante, la charge doit être faible et l'individu doit pouvoir prendre appui en plusieurs points (Figure 19b) : 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 (Voegtlé et Larinier, 2000 ; Lagarde *et al.*, 2016).



Figure 19



a © P. Valade (Ocea Consult)
b © R. Lagarde (Hydrò Réunion)

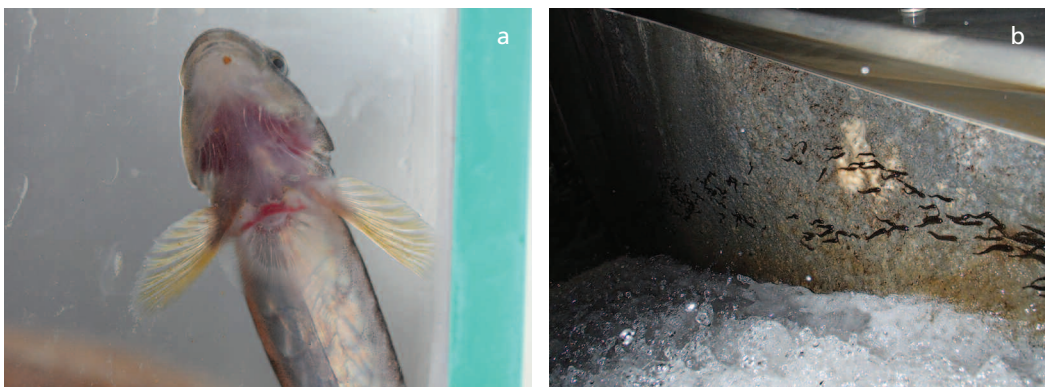
Anguilles en reptation. (a) Très jeunes stades d'anguilles (civelles légèrement pigmentées) en montaison sur des parois verticales. C'est ici essentiellement la tension superficielle qui leur permet de s'accrocher au substrat, (b) Anguille en migration sur un substrat de reptation adapté et offrant un nombre d'appuis suffisant.

Les capacités spécifiques de ventousage des *Gobiidae Sicydiinae*

Les *Sicydiinae* sont une sous-famille des *Gobiidae*. En raison de leur morphologie et de leur petite taille, leurs performances natatoires sont limitées. Cependant, **les *Sicydiinae* ont une ventouse subdiscoïdale** formée par la coalescence des nageoires pelviennes (Figure 20a), qui leur confère des capacités exceptionnelles de franchissement, par escalade des parois humides. En effet, de par cette particularité morphologique et leurs capacités de respiration cutanée, les *Sicydiinae* sont capables de se déplacer par **ventousage** (Figure 20b), à la condition toutefois que le support reste humidifié. C'est par ce mode de déplacement que les poissons arrivent à franchir certains obstacles naturels et artificiels de fortes hauteurs. Ainsi, *Sicydium punctatum*, *Sicydium plumieri*, *Sicyopterus lagocephalus* et *Cotylopus acutipinnis* présentent une large répartition au sein des cours d'eau, depuis l'embouchure jusqu'à plus de 600 m d'altitude (voire plus de 1 000 m à La Réunion).

En complément, et plus particulièrement pour les petits individus, **la force de tension superficielle créée entre leur corps et la paroi humide améliore leur progression sur les parois abruptes**. Comme pour les anguilles, au cours de leur croissance, le rapport poids / tension superficielle (proportionnel à leur longueur) augmente, ce qui explique que les plus petits individus présentent des capacités de franchissement plus importantes que les grands (Voegtli et al., 2002 ; Lagarde et al., 2016).

Figure 20



a © A. Collet (Ocea Consult)
b © R. Lagarde (Hydrò Réunion)

Les capacités de ventousage des *Sicydiinae*. (a) Ventouse subdiscoïdale (formée par coalescence des nageoires pelviennes) chez *Cotylopus rubripinnis*, (b) *Sicyopterus lagocephalus* en progression sur une paroi humide.

Les capacités de franchissement ont été plus particulièrement étudiées chez *Sicyopterus lagocephalus* et *Cotilopus acutipinnis* (Voegtli *et al.*, 2002 ; Lagarde *et al.*, 2016) ; des tests de franchissement de *Sicyopterus lagocephalus* ont été menés sur différents supports (lisse à rugueux) et pour différentes pentes (jusqu'à 90°). Pente et alimentation (charge) du substrat sont des facteurs essentiels et souvent liés, déterminant les possibilités de franchissement des *Sicydiinae*. Pour que leur progression par ventousage soit optimale, les *Sicydiinae* doivent pouvoir bénéficier d'un substrat légèrement humidifié.

À noter que les très jeunes juvéniles d'*Eleotridae*, comme les cabots noirs *Eleotris klunzingerii* et *Eleotris mauritiana*, et certains *Gobiidae*, comme la loche *Awaous commersoni* (Blob *et al.*, 2006) ou le cabot rayé *Stenogobius polyzona*, semblent pouvoir coloniser des secteurs en amont de cassés naturels par escalade, en utilisant leurs nageoires pelviennes et la tension superficielle, comme peuvent le faire les civelles. Toutefois, ces capacités de franchissement semblent limitées au stade post-larvaire et au stade juvénile et restent plus faibles que celles des *Sicydiinae*.

Les capacités spécifiques de marche des macro-crustacés

À l'issue de leur vie marine larvaire, les macro-crustacés peuvent se déplacer en marchant (Figure 21). Au niveau d'une chute ou d'une zone à fortes vitesses d'écoulement, les individus (comme le feraient les anguilles et les *Sicydiinae*) essaient de franchir l'obstacle en limite d'écoulement, c'est à dire sur la zone faiblement alimentée en eau voire tout juste humidifiée par des aspersions.

Ce franchissement se déroule en 3 phases (Fièvet *et al.*, 1998) :

- **une phase de sortie de l'eau** : l'animal marque un temps d'arrêt lorsqu'il est sorti de l'eau. Cet arrêt est moins marqué si les individus se suivent ;
- **une phase de progression (marche)** : les individus prennent appui sur les périopodes P3, P4 et P5. Le déplacement se fait sur la bande humidifiée, en parallèle de l'écoulement. La progression est marquée par des temps d'arrêt (Voegtli *et Valade, obs. pers.*) ;
- **une phase de retour à l'eau** : pour franchir la zone de fort courant en amont d'une chute, les crevettes s'immergent en continuant leur progression par marche sur le substrat. En complément de la marche, *Xiphocaris elongata* (*Xiphocarididae*) est capable de réaliser une succession de 3 à 4 petits sauts à la surface de l'eau, qui lui permettent de franchir cette zone de fort courant (Fièvet *et al.*, 1998 ; Fièvet, 1999a).

Figure 21



Capacités de marche des macro-crustacés. (a) Camaron *Macrobrachium* lar en franchissement par marche à la limite de l'écoulement (en arrière-plan) sur le seuil AEP Bas de l'Ourovéni à Mayotte, (b) Crevette bouledogue *Atyoida serrata* se déplaçant par marche sur un écoulement de très faible hauteur (millimétrique) dans les hauts de La Réunion.

a © P. Valade (Ocea Consult)
b © B. Voegtli (Ecogea)

La pente et l'alimentation (charge) du substrat sont également des facteurs essentiels déterminant les possibilités de franchissement des individus (Hamano *et al.*, 1995 ; Olivier *et al.*, 2013). Pour des questions de pesanteur (ratio taille/poids) et pour une même espèce, les capacités de franchissement semblent être d'autant plus importantes que la taille des individus est faible (Fièvet *et al.*, 1998).

Les espèces d'*Atyidae* et de *Xiphocarididae* disposent de capacités de franchissement plus importantes que les autres macro-crustacés, comme le démontre leur répartition longitudinale sur les différents cours d'eau des territoires insulaires d'outre-mer (Fièvet *et al.*, 2001 ; Olivier *et al.*, 2012 ; Ocea Consult', 2014).

Pour les *Xiphocarididae*, des variations dans leur environnement immédiat (changement de luminosité, ombre portée, variation soudaine des vitesses et/ou de la lame d'eau etc.) pourraient être sources de déstabilisation lors de leur progression sur l'ouvrage (Robert, *obs. pers.*). Toutefois, du fait de connaissances parcellaires sur ce sujet et des difficultés à quantifier ce type d'évènements, ce type de perturbation ne sera pas pris en compte dans la méthode ICE.



Principes généraux de la méthode ICE

- 48 ■ Rappels de la méthode ICE
- 55 ■ Définition des groupes d'espèces
- 68 ■ Rappels des définitions des classes de franchissabilité



Rappels de la méthode ICE

Ses principes et ses limites

L'objectif de la méthode ICE adaptée aux départements insulaires d'outre-mer consiste à diagnostiquer l'état de la franchissabilité d'un obstacle à la montaison par les poissons et les macro-crustacés, en évitant au maximum le recours au dire d'expert.

Comme pour la méthodologie appliquée en métropole, le protocole de mise en œuvre sur le terrain doit être applicable par un **nombre restreint d'opérateurs** (2 à 3) et en un **temps limité** (si possible moins de 3 heures).

Attention. Une restriction concerne donc 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 éventuel et des caractéristiques hydromécaniques des installations, il a été décidé de ne pas définir de critères destinés à appréhender la franchissabilité des ouvrages à la dévalaison. Ainsi, **l'appréciation de l'impact potentiel d'une prise d'eau sur la dévalaison nécessitera une expertise dédiée, menée par des techniciens spécialisés**. Dans ce cadre, le protocole de terrain se propose de recueillir les éléments indispensables à cette expertise.

Le diagnostic des discontinuités à la montaison dans le cadre de la méthode ICE doit permettre de définir facilement la franchissabilité d'un ouvrage, selon des **classes de franchissabilité définies**, pour une espèce ou un **groupe d'espèces**. Le concept de cette méthode repose sur la confrontation du type, de la géométrie des obstacles et des conditions hydrauliques au niveau de ceux-ci avec les capacités de franchissement des espèces considérées.

Ainsi, dans son principe général, la méthode mise en œuvre consiste à **identifier sur chaque ouvrage la ou les voies de passage potentielles** des espèces, de décrire les caractéristiques géométriques de ces voies et les conditions hydrauliques à leur niveau, et de les confronter aux capacités de franchissement des espèces ciblées. À noter que, au droit d'un même obstacle, les voies de passage potentielles peuvent être différentes en fonction des espèces et des stades considérés. Dans ce cas, autant de descriptions doivent être effectuées.

Par opposition aux voies dites « parasites », et dont les écoulements ne sont pas continus jusqu'au cours d'eau en amont de l'ouvrage (par exemple une conduite de débit réservé en charge), les voies de passage potentielles sont des voies dont l'attractivité (position et débit) et la continuité peuvent potentiellement permettre le franchissement de l'ouvrage. La description des caractéristiques géométriques de chaque voie sera ainsi réalisée en levant des profils en long des éléments constitutifs de ces dernières.

La logique de description est de relever les cotes altimétriques de chaque point singulier de l'ouvrage, correspondant à des modifications significatives dans le profil (ex. : rupture de pente). Ces cotes sont relevées selon le sens de 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 (ou inversement). 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 de passage potentielles pour l'espèce ou les espèces considérées (Figures 22 et 23).

Figure 22

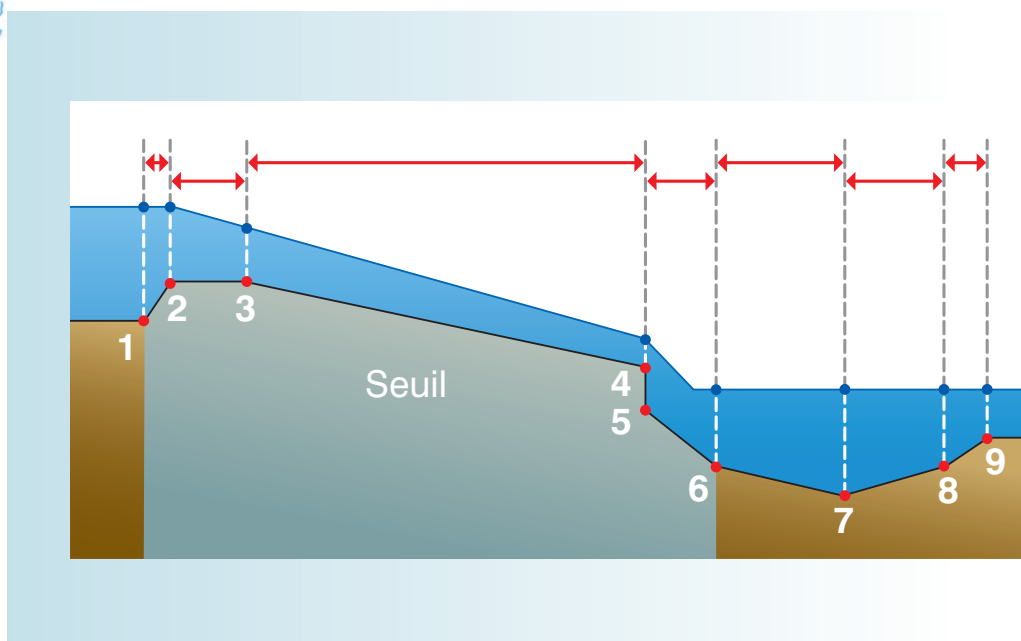


a, b © V. Burgun (AFB)

Exemples de localisation de profils en long à réaliser pour caractériser un ouvrage.

(a) Sur un tel ouvrage, présentant 3 vannages identiques et fermés, le levé d'un seul profil en long paraît suffisant, (b) Dans le cas de ce seuil, il paraît préférable d'effectuer un profil en long sur la partie hors d'eau. Cette partie peut en effet être mise en eau sous d'autres conditions hydrologiques.

Figure 23



© Graphies pour AFB

Exemple de profil en long réalisé sur un ouvrage simple. Modifié d'après Baudoin et al., 2014.

La franchissabilité d'un obstacle dépend avant tout des conditions hydrauliques présentes au niveau des différentes parties qui le compose, à mettre en relation avec les capacités de franchissement du groupe d'espèces considéré. Le levé des lignes d'eau tout au long de chaque profil réalisé est donc également important et doit être effectué simultanément au levé des caractéristiques purement physiques de l'ouvrage.

Or, ces conditions hydrauliques sont fonction non seulement du type d'ouvrage (parement uniformément incliné, parement aval en escalier, obstacle vertical fixe ou mobile, passage busé, présence d'écoulement sous

vannes...) et de sa géométrie (hauteur, profil, pente, longueur, rugosité), mais aussi des débits qui y transitent, c'est-à-dire des conditions hydrologiques en période de migration, qui peuvent s'avérer très variables.

Ainsi, la franchissabilité est très souvent variable selon le débit du cours d'eau, l'ouvrage pouvant par exemple être infranchissable en étiage et totalement effacé en hautes eaux (Figure 24). **Aussi, lors d'un diagnostic ICE, il conviendra de se placer dans la mesure du possible dans des conditions hydrologiques les plus représentatives de la période de migration des espèces ciblées.**

En cas de forts débits, certaines mesures structurelles importantes de l'ouvrage peuvent être très difficiles, voire périlleuses pour l'opérateur, ce qui n'est pas acceptable. *A contrario*, si les conditions d'étiage permettent facilement d'accéder aux ouvrages et de mesurer leurs différentes composantes structurelles, les conditions hydrauliques mesurées peuvent s'avérer très pénalisantes sur le diagnostic de franchissabilité (chute maximale, tirant d'eau faible, fosse d'appel peu profonde...) alors qu'elles sont peu représentatives des conditions les plus fréquemment rencontrées par les poissons ou les macro-crustacés en période de migration.

Ainsi, plusieurs visites sur site, sous différentes conditions hydrologiques (basses eaux et eaux moyennes), s'avèreront souvent nécessaires afin de définir ou affiner la classe de franchissabilité ICE. Par exemple, les mesures structurelles de l'ouvrage pourront être effectuées en période de basses eaux, et les lignes d'eau calées lors d'une deuxième campagne de mesures, à des débits correspondant aux périodes de migration des espèces ciblées.

Si toutefois, lors du diagnostic, les conditions hydrologiques s'avèrent peu représentatives des conditions rencontrées par l'espèce lors de sa migration, il semble toujours intéressant, en complément, d'apprécier la classe de franchissabilité en ignorant les paramètres déclassants 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 à d'autres conditions hydrologiques.

Figure 24



a © P. Valade (Ocea Consult)
b © Deal de La Réunion
c, d © V. Burgun (AFB)

Exemples d'ouvrages à différentes conditions de débit.
Radier sur la rivière Sainte-Suzanne à La Réunion en basses eaux (a) et en hautes eaux (b). Seuil en métropole en basses eaux (c) et en hautes eaux (d).



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 de la méthode 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 un débit ne constituant qu'une fraction infime du débit total transitant par l'ouvrage (attractivité faible).

Attention. La méthode ICE ne permet pas, en présence de voies multiples, de se prononcer sur le degré d'attractivité de chacune d'entre elles. Aussi, pour ce cas, la détermination de la classe de franchissabilité ICE globale de l'ouvrage 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 en fonction de l'hydrologie au niveau du site étudié.

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

Si des analyses plus précises doivent être conduites (ouvrage complexe ou à très fort enjeux pour les espèces diadromes), il conviendra de réaliser une modélisation hydraulique spécifique du site. Elle permettra 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 / stades ciblés.

Cette modélisation hydraulique détaillée devra 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...).

À titre d'exemples, il existe des logiciels gratuits qui peuvent permettre de telles analyses, à savoir :

■ le logiciel FishXing développé notamment par *USDA - Forest Service Pacific Northwest Research Station*. Ce logiciel téléchargeable sur le site Internet <https://www.fs.fed.us/biology/nsaec/fishxing/> a été conçu initialement pour analyser le franchissement des poissons au niveau d'ouvrages routiers mais il peut être utilisé de manière plus générale, par exemple pour modéliser 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/downloads.aspx> est 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 peut le faire *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 mobilisé lors de l'élaboration du présent document pour définir les vitesses d'écoulement sur les coursiers de seuil (voir chapitre dédié aux conditions d'écoulement sur les seuils à parement aval incliné).

N.B. Ce document ne constitue pas le protocole de mise en œuvre sur le terrain, par ailleurs décliné dans une publication distincte, et garant d'un dimensionnement, d'une sécurisation des opérations de terrain comme d'une pratique standardisée.

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 dans cette méthode sont les suivants :

- les seuils, barrages ou passages à gués constitués uniquement de parties fixes ;
- les obstacles présentant des organes mobiles partiellement ou totalement ouverts ;
- les ouvrages routiers présentant des parties hydrauliques (buses, passages à gué) ;
- les ouvrages mixtes, plus complexes et constitués d'éléments de natures différentes.

Dans ce document, différents critères ont été définis pour diagnostiquer la franchissabilité de chacun de ces types d'ouvrages par les principales espèces de poissons et de macro-crustacés des départements insulaires d'outre-mer. Une partie spécifique a été consacrée aux anguilles, aux *Sicydiinae* et aux macro-crustacés, afin de prendre en compte leurs capacités de franchissement particulières respectives de reptation, de ventousage et de marche.

Les prochains chapitres s'articulent autour de ces différentes notions en déclinant les critères évalués et la méthode d'évaluation.

N.B. La méthode ICE pour la métropole propose un pré-diagnostic du fonctionnement des dispositifs de franchissement. Dans les milieux insulaires, très peu d'obstacles sont équipés avec ce type de d'éléments (environ une vingtaine cumulée sur l'ensemble des départements concernés). Au vu du faible retour d'expériences, et du fait que les dispositifs existants ont été réalisés en ne prenant en compte que quelques espèces (exemple : *Gobiidae* à La Réunion), il apparaît **peu pertinent de fournir ici des critères simples permettant d'aboutir à un pré-diagnostic équivalent.**

N.B. L'objectif principal de la démarche ICE étant de diagnostiquer la franchissabilité au niveau d'obstacles anthropiques, **il est important d'essayer de prendre en compte tous les types d'obstacles** dans son adaptation en outre-mer.

Ainsi, dans une logique de restauration de la continuité à l'échelle d'un cours d'eau, le franchissement au niveau des pêcheries devra nécessairement être pris en compte de façon à établir le cadre et les limites de la restauration des obstacles situés plus en amont.

Cependant, compte tenu du manque de connaissances scientifiques sur l'impact direct ou indirect de la pêche, le diagnostic de ce type d'obstacle ne sera pas pris en compte dans le cadre du présent guide.

Pour évaluer le taux réel de franchissement au droit des pêcheries, il faudra, entre autres, caractériser la part du flux de poisson capturée, ainsi que la sélectivité opérée par la pêche (sur la taille des individus, sur leur origine...) et ses conséquences sur les populations d'adultes en amont, ainsi que sur le fonctionnement écologique du cours d'eau. **Une expertise dédiée, menée par des techniciens spécialisés, s'impose alors.**

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 stades œuf, larve ou embryon-libre pour les espèces amphidrome (macro-crustacés indigènes, *Gobiidae*, *Eleotridae*...);
- les adultes pour certains macro-crustacés (ex. : *Macrobrachium sp.*);
- les adultes d'espèces thalassotoques avant la reproduction (*Anguillidae*, *Kuhliidae*).

Au cours de leur migration de dévalaison, ces individus peuvent être confrontés 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 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 dévalants au niveau de différents types d'aménagements.



L'état de la technique et le retour d'expériences concernant les espèces des milieux insulaires ultramarins sont beaucoup moins avancés, mais les premières études ou projets menés depuis près d'une dizaine d'années permettent toutefois de disposer d'éléments techniques.

Parmi les principales solutions techniques envisageables, on peut citer :

- la mise en place de plans de grilles fines associés à un ou plusieurs exutoire(s) : solution adaptée notamment à la dévalaison des individus les plus gros (anguilles, *Kuhliidae*, *Macrobrachium* adultes) ;
- l'arrêt ou la réduction du prélèvement aux périodes de migration : solution adaptée notamment à la dévalaison des jeunes stades (œufs, embryons-libres, larves) ;
- l'installation de turbines « ichtyocompatibles » n'induisant pas de dommage : ce type de turbines est dédié aux faibles chutes, ce qui rend leur installation peu adaptée aux hauteurs de chutes exploitées dans les îles d'outre-mer.

De façon générale, l'efficacité des barrières comportementales (écrans lumineux, sonores, électriques, à bulles...) s'est révélée très décevante sur les espèces de milieux tempérés ou tropicaux et ne permet pas en l'état actuel d'assurer des efficacités suffisantes pour préconiser ce type de solutions. Fièvet *et al.* (2000) semblent montrer toutefois que la lumière a un effet répulsif sur les macro-crustacés adultes et juvéniles, mais elle aurait par contre un effet attractif pour les larves.

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.

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 notamment à des guides techniques généralistes (Larinier *et al.*, 1994 ; Larinier et Travade, 1999, 2002, 2006 ; Courret et Larinier, 2008).

Sur la base des connaissances techniques et biologiques actuelles, Antea - Ocea Consult' - Hydrétudes - Ecogea (2011) ont rédigé pour la Deal de la Réunion une note synthétique visant à décrire les différentes solutions pouvant potentiellement être mises en place pour réduire les impacts des prises d'eau sur les organismes dévalants.

■ Expertise visant à diagnostiquer un ouvrage

Dans le cas d'un aménagement de dérivation hydroélectrique par exemple (Figure 25 page 54), 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, une partie des individus dévalants transite par les ouvrages évacuateurs (déversoirs, vannes, clapets...) et l'autre est entraînée dans le canal d'amenée jusqu'à la centrale.

Lorsqu'un dispositif de franchissement permettant la dévalaison des poissons existe au niveau de la prise d'eau de la centrale, un certain pourcentage d'individus 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 et la morphologie (principalement la taille) des individus, ceux-ci subissent un pourcentage de mortalité plus ou moins important.

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

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

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

- la répartition des passages des individus 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) ;

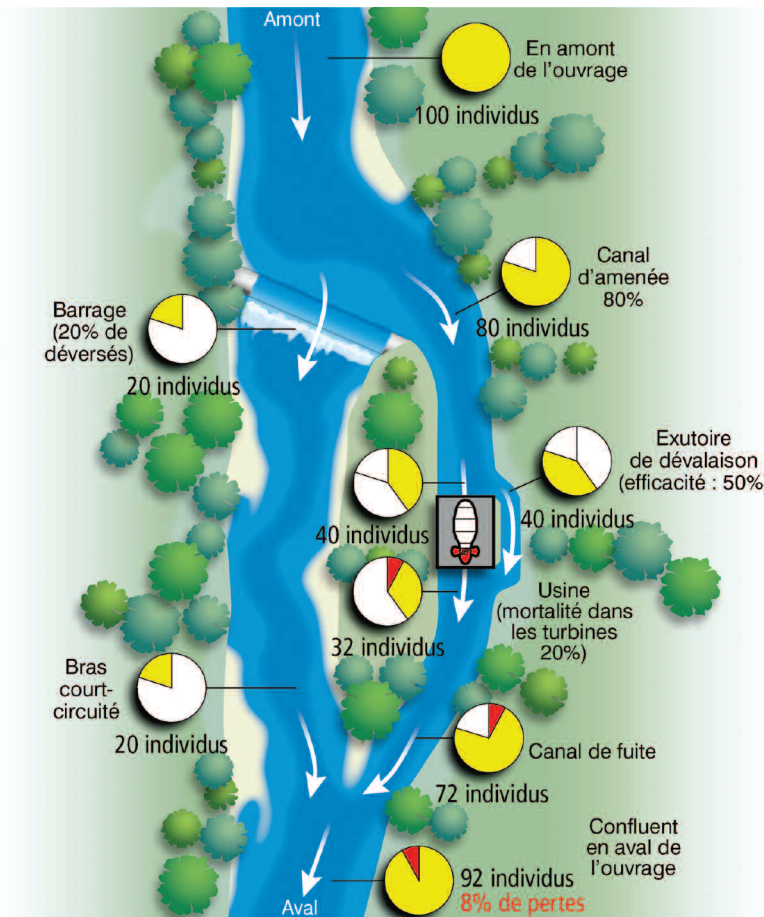
■ les dommages potentiels subis en fonction :

- du type et des caractéristiques des installations hydromécaniques équipant l'aménagement (turbines, pompes...),
- et des caractéristiques morphologiques (principalement la taille) des espèces ;

■ 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.

Pour plus de détails sur l'appréciation des effets potentiels d'un ouvrage ou cumulés d'ouvrages sur un axe de migration, le lecteur pourra se référer au guide méthodologique établi pour la métropole (Baudoin et al., 2014).

Figure 25



© Graphies pour AFB

Schéma type d'un aménagement hydroélectrique en dérivation et principe de la modélisation de ses impacts sur la survie d'organismes dévalant. D'après Voegtli et Larinier, 2004 et modifié par Baudoin et al., 2014

Attention. Dans le cadre de la méthode ICE, au regard de la complexité des mécanismes de dévalaison et de la nécessité d'avoir une bonne connaissance de l'hydrologie du cours d'eau, des modalités de prélèvement, des caractéristiques des installations et des cinétiques de dévalaison des espèces concernées, il a été décidé, comme dans le cadre de la méthodologie développée en métropole, de ne pas définir de critères destinés à appréhender la franchissabilité des ouvrages à la dévalaison. Une expertise dédiée, menée par des techniciens spécialisés, s'impose alors.

Dans tous les cas, des études de recherche et développement doivent être menées pour acquérir des informations sur les rythmes migratoires et les *stimuli* déclenchant les migrations et le comportement des espèces, aux différents stades, au niveau des obstacles.





Définition des groupes d'espèces

Présentation des groupes d'espèces

Pour répondre aux objectifs de la méthode ICE, **les différentes espèces de poissons et de macro-crustacés ont été regroupées en fonction de leurs capacités de franchissement** (voir la section consacrée aux capacités de franchissement des poissons et macro-crustacés). Compte tenu d'un faible niveau de connaissance et de retour d'expérience sur ces espèces, l'approche est volontairement simplifiée et peut aboutir au regroupement d'espèces présentant des caractéristiques (éco-éthologiques ou morphologiques) sensiblement différentes.

Attention. Les groupes et sous-groupes proposés ci-après ne tiennent pas compte de l'intérêt des espèces à franchir un obstacle. Ainsi, au sein d'un même sous-groupe, toute ou partie des espèces peuvent être amenées à tenter, ou non, le franchissement d'un obstacle en fonction de leurs préférences écologiques (c.-à-d. en fonction de la position de l'obstacle au sein de la mosaïque d'habitats nécessaires à l'espèce).

Au final, **5 groupes d'espèces ont été définis** avec certaines subdivisions en sous-groupes. La classification des espèces en différents groupes est décrite ci-après et présentée synthétiquement sous forme de tableaux en fin de chapitre (Tableaux 8 et 9 pages 66 et 67).

Pour chaque groupe ou sous-groupe de poissons, les vitesses maximales 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 menées lors de franchissements d'obstacles *in situ*.

Les tirants d'eau minimums nécessaires aux différents groupe d'espèces pour nager ont été appréciés à partir du facteur de forme (k) des individus et en considérant globalement une hauteur minimale d'eau (h_{\min}) voisine de 1,5 fois la hauteur moyenne des individus (voir chapitre relatif aux capacités de franchissement des poissons et des macro-crustacés de la partie « Continuité écologique, ichtyofaune et carcinofaune »).

N.B. Dans le cadre de cette méthodologie, la volonté a été de ne pas multiplier excessivement le nombre de groupes. Cependant, la violence des crues dans ces territoires provoque des dévalaisons forcées d'individus de tous stades, créant ainsi *a posteriori* un besoin de recolonisation vers l'amont pour tous les stades présents en eau douce.

Ainsi, toutes les espèces sont susceptibles de se déplacer et de franchir des obstacles à des stades assez variés (du stade juvénile au stade adulte).

■ Premier groupe : poissons sans adaptation morphologique particulière pour le franchissement

Le groupe 1 est constitué de 21 petites espèces, plutôt benthiques, qui peuvent nager très près du fond et profiter alors des plus faibles vitesses de courant : *Eleotridae*, *Gobiidae* (Figure 26 page 56).

Figure 26



a, b © P. Valade (Ocea Consult)
c, d © A. Collet (Ocea Consult)

Espèces du premier groupe.

(a) Cabot noir (*Eleotris klunzingerii*), (b) Loche des sables (*Awaous commersoni*), (c) Cabot rayé (*Stenogobius polyzona*), (d) *Eleotris cyprin* (*Hypseleotris cyprinoides*).

Ces espèces se déplacent par nage en « bonds » successifs sur le fond du lit, d'un abri à l'autre. Elles sont inféodées aux zones aval des cours d'eau. Elles ne possèdent pas de capacités particulières de franchissement (ni ventousage, ni reptation, ni saut).

Aux stades post-larve et juvénile, ces espèces peuvent toutefois progresser sur des parois verticales par escalade en utilisant la tension superficielle, ce qui leur confère des capacités singulières de franchissement.

Ainsi, au regard des différences de capacités de franchissement par escalade et par nage selon la taille des individus, le groupe 1 a été divisé en **deux sous-groupes**.

Le sous-groupe 1a est constitué des stades les plus âgés (adultes et sub-adultes) de ces espèces, individus de tailles supérieures au sous-groupe 1b, et comprises entre 40 et 150 mm environ.

Pour prendre en compte le comportement benthique des espèces du groupe 1a, **il a été retenu pour l'ensemble du sous-groupe 1a un tirant d'eau minimal (h_{\min}) de l'ordre de 5 cm** pour assurer le passage des individus.

L'ensemble de ces espèces a la particularité de pouvoir profiter des couches limites à proximité du fond du cours d'eau, au niveau desquelles les vitesses d'écoulement sont plus faibles. Aussi, pour prendre en compte cette spécificité, et dans la mesure où il est très difficile d'apprécier les vitesses au niveau de la couche limite, il a été retenu pour ce sous-groupe 1a des **vitesse de sprint volontairement surestimées et comprises entre 1,5 et 3,0 m/s** (vitesse de sprint moyenne de l'ordre de 2,25 m/s).

Le sous-groupe 1b contient les stades post-larvaires et juvéniles des petites espèces benthiques du groupe 1a dont les individus sont capables, à ces stades, d'utiliser les forces de tension superficielle dans des zones humides en bordure d'écoulement pour franchir des obstacles sub-verticaux.

Des individus de *Eleotris klunzingerii* et *Awaous commersoni* ont été observés en franchissement et/ou en amont d'obstacles naturels sub-verticaux de plusieurs mètres (rivière Langevin à La Réunion et rivière Bouyouni à Mayotte). Pour *Awaous*, les nageoires pectorales forment une ventouse « imparfaite », qui aide les individus lors du franchissement (Blob et al., 2006).



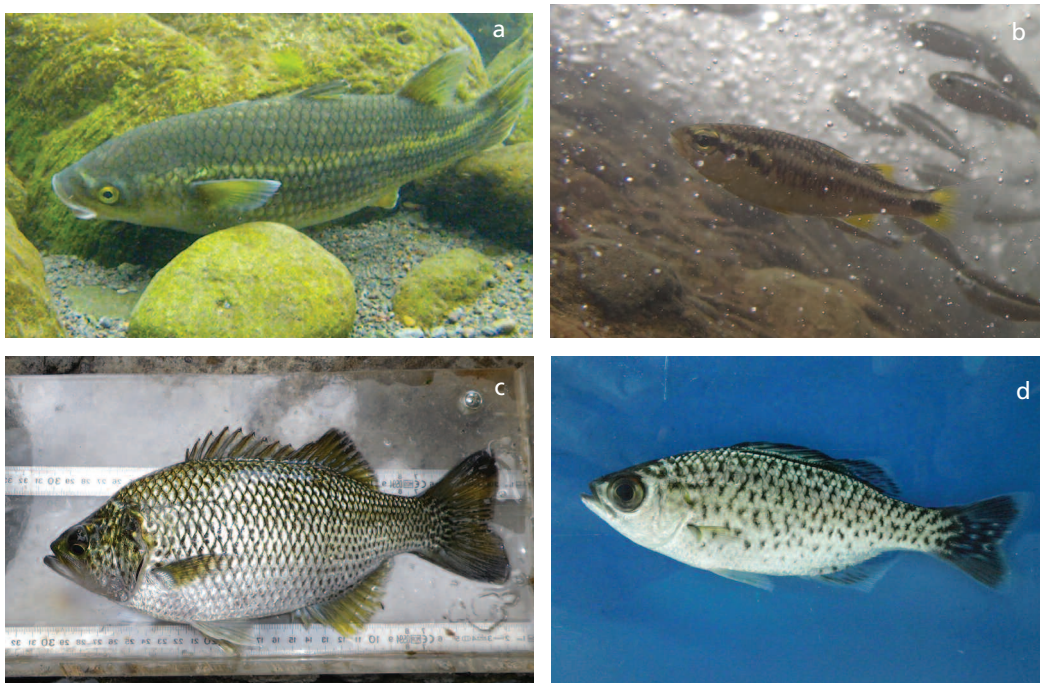
Au vu de leur taille (comprise entre 15 et 50 mm) et de leur morphologie, leurs capacités de nage sont forcément faibles, même s'il n'existe pas à ce jour d'études à ce propos. Aussi, **il a été retenu des vitesses de sprint U_{max} comprises entre 0,5 et 1,5 m/s (1,0 m/s en moyenne pour ces jeunes stades).**

Suite à des observations visuelles d'individus en progression (Valade et Voegtlié, *obs. pers.*), il semble que leur **capacité d'escalade** (utilisation de la tension superficielle) **ne peut pleinement s'exprimer que pour un tirant d'eau maximal de l'ordre de 1 cm. Au-delà de cette valeur, il sera considéré que la lame d'eau est suffisante pour que ces petits stades utilisent la nage comme mode de progression.**

■ Deuxième groupe : poissons ayant des aptitudes au saut

Ce groupe est constitué de deux genres regroupant 5 espèces : les mulets d'eau douce *Agonostomus telfairii*, *Agonostomus monticola* et *Agonostomus catalai* et les poissons plats *Kuhlia rupestris* et *Kuhlia sauvagii* (Figure 27).

Figure 27



Espèces du deuxième groupe

(a) Adulte de mullet (*Agonostomus* sp.) dans les rivières de La Réunion, (b) Juvénile de mullet de montagne (*Agonostomus monticola*), (c) Poisson plat (*Kuhlia rupestris*), (d) Poisson plat (*Kuhlia sauvagii*).

a, d © P. Valade (Ocea Consult)
b © B. Voegtlié (Ecogea)
c © P. Hoarau (Ocea Consult)

Les adultes de *Kuhlia* effectuent des migrations de dévalaison en mer pour se reproduire et recolonisent ensuite la rivière pour poursuivre leur développement. Les mulets d'eau douce, quant à eux, sont ici considérés comme des espèces amphidromes et se reproduisent en rivière (statut migratoire encore controversé selon les auteurs, voir la section consacrée aux différents types de migrateurs). Toutefois, des déplacements d'adultes de mulets au sein du bassin versant surviennent à la suite des crues cycloniques ; les individus ayant dévalé au cours de la crue migrent ensuite vers l'amont pour recoloniser les habitats laissés vides (Smith et Kwak, 2014a).

De par leurs morphologies respectives, les *Kuhlia* et les *Agonostomus* ne semblent pas présenter *a priori* des capacités de saut identiques. Les capacités de saut ont été observées chez *Agonostomus monticola* pour des juvéniles (Martinique / Guadeloupe, 2013, individus de longueur totale (L_p) entre 40 et 100 mm, Voegtlié et Valade, *obs. pers.*) ainsi que pour des adultes (La Réunion, 2008, L_p entre 150 et 200 mm, Voegtlié et Valade,

obs. pers.). Des observations complémentaires menées en 2014 et en 2017 sur les prises d'eau de la Barthole, de Goyaves, et sur le gué de Ravine Chaude (Guadeloupe) ont permis de noter des sauts de 30 à 70 cm pour des poissons de taille estimée entre 10 et 30 cm (Robert, 2015).

Pour les *Kuhlia*, aucune tentative de franchissement par saut n'a été rapportée dans les territoires concernés, mais la morphologie de ces espèces laisse à penser qu'elles sont capables de sauter. Des opérations de repeuplements menés en Australie ont également mis en évidence des déplacements de *Kuhlia rupestris* en amont de petits cassés, mais sans apporter d'observations directes sur les conditions de franchissement des poissons (Marsden, 2016). En captivité, *Kuhlia rupestris* possède de très fortes capacités de saut, nécessitant des dispositions particulières pour son confinement (Hutchison et al., 2016).

Compte tenu des caractéristiques des deux genres inclus dans ce groupe 2 et des variabilités de tailles observées au cours des phases migratoires, 4 sous-groupes ont été établis, divisant les 2 genres en fonction du stade de développement.

Le sous-groupe 2a comprend les subadultes et adultes de mulets d'eau douce (*Agonostomus*) ayant dévalé lors de crues cycloniques et qui peuvent alors être amenés à franchir des obstacles pour recoloniser certains tronçons de cours d'eau. Ces individus peuvent avoir des tailles variées ; une fourchette large de 100 à 250 mm est proposée ici pour englober les différents stades de développement.

Ces poissons sont de très bons sauteurs et de très bons nageurs et peuvent franchir, dans certaines configurations, des chutes dépassant un mètre.

Il a été retenu des vitesses de sprint U_{max} comprises entre 3,0 et 6,0 m/s (moyenne de 4,5 m/s), ce qui semble être en accord avec les vitesses de sprint du mulot cabot *Mugil cephalus* (de l'ordre de 4 m/s pour des poissons d'une vingtaine de centimètres d'après FishBase).

Pour ce sous-groupe, le tirant d'eau minimal (h_{min}) retenu pour assurer le franchissement des individus par la nage est de l'ordre de 5 cm.

Le sous-groupe 2b comprend les juvéniles de mulets d'eau douce (*Agonostomus*) qui colonisent les habitats de rivière à l'issue de la phase larvaire marine. Ces juvéniles ont une taille moyenne comprise entre 25 et 40 mm à proximité de l'embouchure. La classe de taille de ce sous-groupe peut être étendue jusqu'à 100 mm de façon à intégrer les juvéniles sur l'ensemble de leur phase principale de colonisation de la rivière.

Il a été retenu des vitesses de sprint U_{max} comprises entre 2,0 et 3,0 m/s (moyenne de 2,5 m/s).

Pour ce sous-groupe, le tirant d'eau minimal (h_{min}) pour assurer le franchissement par nage des individus est de l'ordre de 5 cm également.

Le sous-groupe 2c comprend les subadultes et adultes de poissons plats (*Kuhlia*), qui recolonisent la rivière suite à une reproduction en mer. Pour ces individus, la taille minimale à maturité est supérieure à 170 mm pour les mâles et 250 mm pour les femelles (Hogan et Nicholson, 1987). La taille maximale connue pour cette espèce est de 450 mm pour un poids de 2,7 à 3 kg, et sa hauteur est comprise entre 33 et 38% de sa longueur standard (Merrick et al., 1984 ; Randall et al., 2001 dans Pusey et al., 2004).

Il a été retenu des vitesses de sprint U_{max} comprises entre 2,5 et 6,0 m/s (moyenne de 4,25 m/s).

Pour ce sous-groupe, en considérant un individu d'une longueur de 25 cm, le tirant d'eau minimal (h_{min}) pour assurer le franchissement par la nage est de l'ordre de 10 cm.

Le sous-groupe 2d comprend les juvéniles de poissons plats (*Kuhlia*), qui colonisent les cours d'eau à l'issue de leur phase marine larvaire. Ces juvéniles ont une taille moyenne de 20 à 35 mm à proximité de l'embouchure. La classe de taille de ce sous-groupe peut être étendue jusqu'à 100 mm, de façon à intégrer les juvéniles au cours de l'ensemble de leur phase de colonisation de la rivière.



Il a été retenu des vitesses de sprint U_{\max} comprises entre 0,5 et 2,0 m/s (moyenne de 1,25 m/s).

Pour ce sous-groupe, le tirant d'eau minimal (h_{\min}) pour assurer le franchissement des individus par la nage est de l'ordre de 5 cm.

■ Troisième groupe : poissons ayant des aptitudes de reptation

Ce groupe est constitué des 5 espèces d'anguilles présentes dans les Drom insulaires.

Comme signalé au chapitre relatif aux capacités de franchissement des poissons et des macro-crustacés, **les anguilles sont à considérer différemment des autres espèces** en raison notamment de leurs aptitudes à franchir des barrières physiques par reptation sur des surfaces mouillées.

Leurs capacités de nage sont faibles en comparaison d'individus d'autres espèces présentant des tailles comparables. Pour les civelles, les vitesses maximales de nage sont de l'ordre de 30-50 cm/s. Pour les plus grands individus, ces vitesses sont inférieures à 2 m/s.

En revanche, **les anguilles ont de très fortes capacités de reptation** qui, associées à une capacité temporaire de respiration aérienne en contexte très humide, lui permettent de franchir des barrières physiques de hauteur importante, mais à faible charge (faible vitesse / hauteur d'eau). En complément, les plus jeunes individus sont capables de se déplacer sur des surfaces verticales humides en utilisant les forces de tension superficielles créées entre leur corps et la paroi (forces proportionnelles à la surface de contact). Au cours de la croissance du poisson, le rapport entre cette force de tension et le poids diminue jusqu'à ne plus permettre le maintien vertical de l'individu. Ainsi, seuls les petits individus (de taille inférieure à une douzaine de cm) sont réellement capables de franchir des obstacles verticaux ou subverticaux.

Certaines espèces d'anguilles tropicales atteignent des tailles et des poids nettement supérieurs à ceux de l'anguille européenne, qui a servi de référence dans la méthodologie développée en métropole. En particulier, l'anguille marbrée *Anguilla marmorata* ou *giant mottled eel* peut atteindre une taille de 2 m de long (Keith *et al.*, 2006). À Mayotte, par exemple, des individus de plus de 700 mm et 1 kg sont assez régulièrement observés ; ils représentent 8 % des individus capturés en 2014 dans le cadre du réseau de contrôle de surveillance - RCS (Ocea Consult', 2014).

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

Ainsi, au regard des différences de capacités de franchissement par reptation et par nage selon la taille des individus, le groupe 3 a été divisé en trois sous-groupes en fonction des stades de développement (Figure 28 page 60).

Le sous-groupe 3a correspond aux stades « jaunes » d'anguilles marbrées *Anguilla marmorata*, et aux adultes des autres espèces qui se déplaceraient au sein du cours d'eau pour recoloniser des habitats suite à une période de crue ou de sécheresse intense (individus de **taille supérieure à 500 mm**). Ces individus présentent un poids important et une forte puissance musculaire liée à une taille imposante.

Le sous-groupe 3b correspondant aux anguilles « jaunes » de taille comprise entre 100 et 500 mm, toutes espèces confondues.

Le sous-groupe 3c correspond aux plus jeunes stades (individus de taille inférieure à une dizaine de centimètres, correspondant globalement au stade civelle). À noter ici que les civelles des anguilles tropicales pénètrent dans les hydrosystèmes à des tailles légèrement inférieures à celles de l'anguille européenne, ce qui leur confère des capacités de franchissement supérieures à celle-ci lors des premières semaines de développement en rivière (ratio tension superficielle / poids plus favorable). **Au vu de ses capacités de nage, il peut être considéré que tout ouvrage présentant une chute constitue un obstacle majeur pour ce sous-groupe, dès lors que celui-ci doit franchir l'ouvrage par la nage.**

En l'absence de connaissances spécifiques aux taxons tropicaux, les performances des anguilles européennes servent ici de référence. Il a été retenu pour les anguilles des vitesses de sprint U_{max} de l'ordre de 2,0 m/s pour le sous-groupe 3a, de 1,5 m/s pour le sous-groupe 3b et de 0,5 m/s pour les plus jeunes stades du sous-groupe 3c.

Bien qu'elles utilisent généralement leurs capacités de respiration cutanée et de reptation pour franchir les obstacles, il est possible toutefois de penser que la capacité de reptation des anguilles ne peut pleinement s'exprimer que pour un tirant d'eau maximal de l'ordre de 2 cm. Au-delà de cette valeur, il sera considéré que la lame d'eau est suffisante pour assurer la nage des anguillettes (sous-groupe 3b). Il sera en revanche considéré, pour les gros sujets (sous-groupe 3a), qu'un tirant d'eau de l'ordre de 5 cm est nécessaire pour un franchissement par la nage.

Figure 28



a, b, c, d © P. Valade (Ocea Consult)

Les trois stades d'anguilles définissant le troisième groupe.
 (a) Anguille marbrée de plus de 500 mm (sous-groupe 3a), (b) Anguille du Mozambique (*Anguilla mossambica*, sous-groupe 3b), (c) Civelles translucides (*Anguilla* sp., sous-groupe 3c), (d) Anguilllette pigmentée (*Anguilla* sp., sous-groupe 3c).

■ Quatrième groupe : poissons ayant des capacités de ventousage

Le groupe 4 est constitué par les espèces de *Gobiidae Sicydiinae* dont les nageoires ventrales sont soudées et forment une ventouse (Figure 29). Cette particularité permet aux poissons de franchir des parois abruptes en s'aidant également de leur bouche comme *Sicyopterus lagocephalus*, ou de leurs nageoires pectorales comme *Cotilopus acutipinnis* (Voegtli et al., 2002 ; Schoenfuss et Blob, 2003).

Les capacités de franchissement de ces espèces sont très importantes pour les juvéniles, qui peuvent franchir des parois verticales voire en surplomb. À la défaveur du poids, les individus adultes ont des capacités de franchissement plus faibles, qui se traduisent par des pentes et/ou longueurs de franchissement plus limitées (Voegtli et al., 2002).

Compte tenu de ces caractéristiques, deux sous-groupes sont proposés.

Le sous-groupe 4a représente les subadultes ou adultes de *Sicydiinae*. La taille des individus concernés est comprise entre 40 et 150 mm.



L'ensemble des individus de ces espèces a la particularité de pouvoir profiter des couches limites à proximité du fond du cours d'eau, au niveau desquelles les vitesses d'écoulement sont plus faibles. De plus, les *Sicydiinae* ont également une capacité particulière à franchir les obstacles par nage selon un principe de *burst and attach* qui consiste en une alternance de nage en vitesse de sprint et d'accrochage au substrat avec leur ventouse.

Il a été retenu pour ce sous-groupe 4a des vitesses de sprint U_{max} comprises entre 2,0 et 4,5 m/s (vitesse moyenne de l'ordre de 3,25 m/s).

Pour l'ensemble du sous-groupe 4a, il a été retenu un tirant d'eau minimal (h_{min}) de l'ordre de 5 cm pour assurer le passage des individus par la nage.

Le sous-groupe 4b représente les post-larves et juvéniles de *Sicydiinae*. En fonction des espèces, la taille des individus concernés varie entre 15 et 40 mm. Les possibilités de franchissement de ces individus seront étudiées en fonction de la présence et de la disposition des supports humides pouvant être utilisés pour le franchissement de l'obstacle.

Au vu de leur faible taille et de leur morphologie, les capacités de nage des individus de ce sous-groupe sont *a priori* limitées, même s'il n'existe pas à ce jour d'études à ce sujet. Aussi, il a été retenu, comme pour le sous-groupe 1b, des vitesses de sprint U_{max} comprises entre 0,5 et 1,5 m/s (1,0 m/s en moyenne pour ces jeunes stades).

Il a été retenu pour l'ensemble du sous-groupe 4b un tirant d'eau minimal (h_{min}) de l'ordre de 1 cm pour assurer le franchissement des individus par la nage.

Figure 29



a, c, d © P. Valade (Ocea Consult)
b © A. Collet (Ocea Consult)

Espèces du quatrième groupe.

(a) Sous groupe 4a - Cabot bouche-ronde, *Sicyopterus lagocephalus*, espèces Indo-Pacifique, (b) Sous groupe 4a - Cabot rubis, *Cotylopus rubripinnis*, espèce endémique de l'archipel des Comores, (c) Sous groupe 4a - Cabot bouche-ronde, *Cotylopus acutipinnis*, espèce endémique de l'archipel des Mascareignes, (d) Sous groupe 4b - juvéniles de bouches-rondes *S. lagocephalus* (plus gros individu - $L_p \sim 32$ mm) et de *C. acutipinnis* (plus petit individu - $L_p \sim 21$ mm) une semaine après leur recrutement en eau douce.

N.B.

Au vu des observations visuelles *in situ* d'individus en progression et des travaux menés par Voegtli et al. (2002) et Lagarde et al. (2016), il sera retenu que les capacités de ventousage des individus du 4^e groupe ne peuvent pleinement s'exprimer que pour un tirant d'eau maximal de l'ordre de 1 cm, quel que soit le stade.

■ Cinquième groupe : les macro-crustacés décapodes

Le groupe 5 est spécifique aux macro-crustacés décapodes (Figure 30). Ces derniers ont de faibles capacités de nage ou de saut, mais ils possèdent de très fortes capacités de franchissement par marche grâce aux 5 paires de pattes (périopodes) dont ils disposent, bien qu'ils n'en utilisent que 3 paires (P3, P4 et P5) pour se déplacer.

Des capacités de saut à la surface de l'eau (en « ricochets ») ont également été observées chez *Xiphocaris elongata*, pour franchir une zone de fort courant (Fièvet *et al.*, 1998 ; Fièvet, 1999a ; Monti, *com. pers.*).

Les capacités de franchissement peuvent diminuer avec l'augmentation de la taille des individus. Pour les petites espèces des familles des *Atyidae* ou des *Xiphocarididae*, la faible taille des individus adultes n'entraîne pas de diminution significative de leurs capacités de franchissement en comparaison de celle des juvéniles. En revanche, pour les espèces du genre *Macrobrachium*, les tailles et les poids relativement élevés des adultes à maturité, jusqu'à plus de 30 grammes pour *Macrobrachium lar* (Sethi *et al.*, 2012 ; Ocea Consult', 2014a) peuvent diminuer les capacités de franchissement sur des parois verticales ou subverticales, même si ces individus peuvent utiliser leurs périopodes P1 (pinces parfois puissantes) pour s'agripper (Fièvet, 1999b).

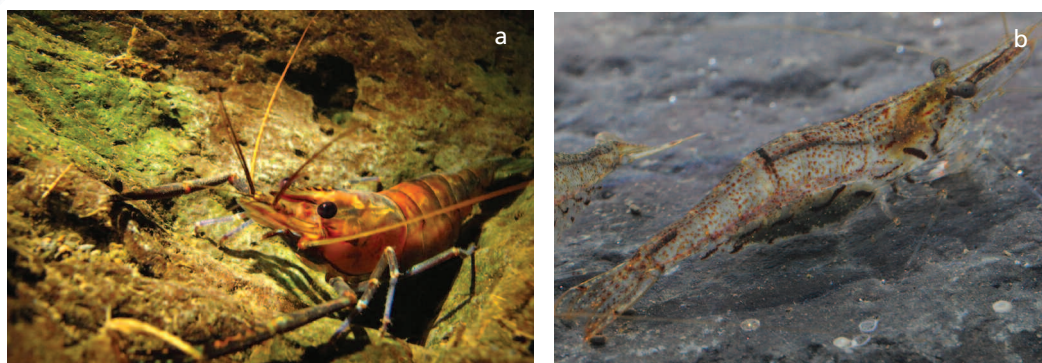
Ces capacités de franchissement ne trouvent pratiquement pas de limite en milieu naturel (Ocea et Antea, 2013), hormis les zones d'assec ou la colonisation des zones amont pour les individus ayant déjà atteint une taille limite pour le franchissement vertical. Chez les macro-crustacés, la répartition longitudinale naturelle des individus sera donc principalement établie par rapport aux exigences écologiques (préférences d'habitat, alimentation, préférence thermique, tolérance à l'hypoxie...).

Deux sous-groupes ont été établis.

Le sous-groupe 5a correspond aux adultes des espèces du genre *Macrobrachium*. La taille des individus à maturité se situe au-dessus de 40 à 60 mm (Sethi *et al.*, 2014 ; Ocea Consult', 2014b ; Hoarau *et al.*, 2018). Ils possèdent de fortes capacités de franchissement sur des voies humides. Les espèces de crabes d'eau douce amphidromes (*Grapsidae*) sont également associées à ce sous-groupe.

Le sous-groupe 5b correspond aux espèces d'*Atyidae*, de *Xiphocarididae* ainsi qu'aux juvéniles du groupe 5a. Ces individus possèdent des capacités de franchissement supérieures à celles des individus du sous-groupe 5a pour le franchissement de parois humides verticales voire en surplomb (Fièvet, 2000).

Figure 30



Espèces du cinquième groupe.

(a) Camaron (*Macrobrachium lar*, Réunion) (sous-groupe 5a), (b) Caridine à long rostre (*Caridina longirostris*, Mayotte) (sous-groupe 5b).

a, © P. Valade (Ocea Consult')
b © A. Collet (Ocea Consult')

Cas des espèces non mentionnées dans les précédents groupes

Les atlas des poissons et des crustacés d'eau douce de la Martinique (Lim *et al.*, 2002), de la Guadeloupe (Monti *et al.*, 2010), de la Réunion (Keith *et al.*, 1999), et des Comores, Mascareignes et Seychelles (Keith *et al.*, 2006) renseignent sur l'existence de plusieurs dizaines d'espèces de poissons et de crustacés dans les Drom insulaires.

Dans un souci de simplification, le choix a été fait de ne prendre en considération dans ce document que les taxons les plus fréquemment observés et à plus fortes valeurs patrimoniales ou économiques.

Les espèces vicariantes -- ou supposés comme telles -- sont peu répandues au sein des cours d'eau et n'ont pas été prises en compte au vu des fortes lacunes dans la connaissance de leurs caractéristiques biologiques et de leurs capacités de franchissement.

Ainsi, les petites espèces pélagiques de la famille des *Ambassidae* (*Ambassis ambassis* et *A. natalensis*) ou des *Syngnathidae* (*Microphis lineatus*, *M. argulus* et *M. brachyurus*), présentes de manière anecdotique ou essentiellement dans les parties très basses des cours d'eau, n'ont pas été intégrées.

De même, les deux espèces de tarpon (*Megalops atlanticus* et *M. cyprinoides*), qui migrent aux stades juvéniles jusqu'à plusieurs centaines de mètres en amont des embouchures, n'ont pas été prises en compte.

Les deux espèces euryhalines de brochet (*Centropomus ensiferus* et *C. undecimalis*), présentes anecdotiquement dans certaines parties basses des cours d'eau de la Martinique n'ont pas non plus été intégrées.

Le crabe *Guinotia dentata* (cirrique des rivières), bien qu'inféodé aux milieux aquatiques, est capable de se rencontrer jusqu'à plusieurs dizaines de mètres des cours d'eau. Ses capacités de déplacement par voie terrestre ont conduit à ne pas le prendre en considération dans la démarche.

De plus, seules les espèces indigènes ont été prises en compte. Globalement, l'introduction d'espèces en milieu insulaire peut induire de graves perturbations écologiques, en provoquant potentiellement une diminution voire une disparition d'espèces indigènes (compétition trophique et spatiale, prédation, dégradation de l'habitat). L'établissement d'un diagnostic de la franchissabilité des ouvrages pour ces espèces en vue de proposer de potentielles solutions d'amélioration n'est donc pas approprié.

De ce fait, en ce qui concerne les poissons, le tilapia (*Oreochromis mossambicus*), les *Poeciliidae* (guppy, golomine, gambusie, porte-épée), le gourami (*Osphronemus gorami*), la truite arc en ciel (*Oncorhynchus mykiss*) n'ont pas été pris en compte. Pour les crustacés, la chevette d'élevage (*Macrobrachium rosenbergii*) et l'écrevisse australienne (*Cherax quadricarinatus*) ont été introduites dans les milieux insulaires d'outre-mer mais ne semblent pour l'instant pas acclimatées (gestionnaire de la Réserve naturelle nationale de l'Étang Saint-Paul à La Réunion, *com. pers.*), ne provoquant ainsi actuellement qu'un impact faible ou nul sur les populations de crustacés indigènes.

Au vu de l'état des connaissances, très limité, de la biologie et des périodes de migration des différents stades de mollusques gastéropodes, ceux-ci n'ont pas été intégrés à la démarche. À noter toutefois que de nombreux mollusques gastéropodes des îles tropicales insulaires ont également un cycle de vie amphidrome (McDowall, 2007). Les migrations de mollusques, et en particulier de néritines, peuvent être ponctuellement massives (Pyron et Covich, 2003 ; Blanco et Scatena, 2007).

La liste des espèces considérées ainsi que leurs modalités de franchissement et les groupes ICE associés sont présentés dans les tableaux 7 et 8 pages 64 à 66. Le tableau 9 page 67 récapitule plus spécifiquement les capacités de nage et de saut théoriques calculées des espèces de poissons.

Attention. Ces variables théoriques sont ensuite ajustées lors du diagnostic de la franchissabilité à la montaison (chapitre dédié, page 71), à partir d'observations visuelles menées lors de franchissements d'obstacles *in situ*.

Tableau 7

Liste des espèces considérées dans le cadre de la présente méthode, territoire concerné, modes de franchissement, tailles et groupes ICE associés

	Familie	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom				Mode de franchissement	Stade et/ou taille	Groupe ICE
				Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion			
POISSONS	Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Nage / Reptation	Lp > 500 mm	3a
		<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolor (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Nage / Reptation	100 mm < Lp < 500 mm	3b
		<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Nage / Reptation / Escalade	Lp < 100 mm	3c
		<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X			
		<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X					
	Eleotridae	<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X	Nage	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	1a
		<i>Dormitor maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nèg, dormeur (C)	X	X					
		<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X						
		<i>Eleotris klunzingerii</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X			
		<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X			
		<i>Eleotris pemiger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X			Nage / Escalade	Juvénile (Lp < 40 mm)	1b
		<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormè, dormeur (C)	X	X					
		<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X					
		<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X			
		<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)			X				
	<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)			X					
	Gobiesocidae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / têtard, macouba, colle-roche (C)	X	X			Nage / Ventousage	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	4a
			Juvénile (Lp < 40 mm)						4b	
	Gobiidae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X			Nage	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	1a
		<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X			
		<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X					
		<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X				
		<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X			
		<i>Glossogobius kokius</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X	Nage / Escalade	Juvénile (Lp < 40 mm)	1b
		<i>Mugilogobius mertoni</i>	Gobi millet (C)			X				
		<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobie drapeau (F)			X				
		<i>Redigobius balteatus</i>	Gobi tase (C)			X				
		<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X			
	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X	Nage / Ventousage	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	4a	
	<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X					
	<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)			X	X				
	<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X						
	<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot à bec de lièvre, cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)	X	X						
Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie des rochers (F) /			X	X	Nage / Saut	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	2c	
	<i>Kuhlia sauvagii</i>	doule de roche, carpe (C)			X	X		Juvénile (Lp < 100 mm)	2d	
Mugilidae	<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)			X		Nage / Saut	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	2a	
	<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F)	X	X				Juvénile (Lp < 100 mm)	2b	
	<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X				

Tableau 7 bis Liste des espèces considérées dans le cadre de la présente méthode, territoire concerné, modes de franchissement, tailles et groupes ICE associés

	Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom				Mode de franchissement	Stade et/ou taille	Groupe ICE
				Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion			
CRUSTACÉS	Atyidae	<i>Atya innocous</i>	Crevette (F) / cacador, bouc, grand bouc (C)	X	X			Nage négligeable / Marche	Tout stade	5b
		<i>Atya scabra</i>	Crevette (F) / cacador, bouc, grand bouc (C)	X	X					
		<i>Atyoida serrata</i>	Crevette bouledogue (F) (C)			X	X			
		<i>Caridina longirostris</i>	Caridine à long rostre (F) / chevaquine (C)			X				
		<i>Caridina serratirostris</i>	Caridine serratulée (F) / chevaquine, sevret tas blanc (C)			X	X			
		<i>Caridina typus</i>	Caridine type (F) / chevaquine (C)			X	X			
		<i>Jonga serrei</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X						
		<i>Micratya poeyi</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X	X					
		<i>Potimirim glabra</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X						
		<i>Potimirim potimirim</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X	X					
	Grapsidae	<i>Sesamops impressum</i>	Crabe de rivière (C)			X		Nage négligeable / Marche	Subadulte / Adulte	5a
		<i>Varuna litterata</i>	Crabe lisible (F) / crabe de rivière (C)			X	X		Juvenile	5b
	Palaemonidae	<i>Macrobrachium acanthurus</i>	Écrevisse (F) / chevrette, bouquet cannelle (C)	X	X			Nage négligeable / Marche	Subadulte / Adulte	5a
		<i>Macrobrachium australe</i>	Chevrette australe (F) / chevrette grand bras (C)			X	X			
		<i>Macrobrachium carcinus</i>	Écrevisse (F) / ouassou, z'habitant, écrevisse, bouquet pintade (C)	X	X					
		<i>Macrobrachium crenulatum</i>	Écrevisse (F) / queue rouge, queue de madras (C)	X	X					
		<i>Macrobrachium equidens</i>	Crevette à pinces longues (F) / camaron tacheté, kanmaron (C)			X				
		<i>Macrobrachium faustinum</i>	Écrevisse (F) / alexis, gros mordant, écrevisse (C)	X	X					
		<i>Macrobrachium heterochirus</i>	Écrevisse (F) / grand bras, écrevisse (C)	X	X					
<i>Macrobrachium hirtimanus</i>		Chevrette des Mascariens (F) / écrevisse, chevrette lecroc (C) (disparue ?)				?				
<i>Macrobrachium lar</i>		Bouquet singe (F) / chevrette, camaron, kanmaron gran lebra (C)			X	X				
<i>Macrobrachium lepidactylus</i>		Écrevisse bétangue (C)			X	X				
<i>Palaemon pandaliformis</i>	Crevette transparente (F) / bouquet potilinga (C)	X	X							
Xiphocarididae	<i>Xiphocaris elongata</i>	Crevette (F) / pissette (C)	X	X			Nage négligeable / Marche	Tout stade	5b	

Tableau 8

Tableau récapitulatif des groupes d'espèces ICE et des modes de franchissement associés

Groupe ICE	Famille	Espèce	Principaux noms français (F) / créole (C)	Mode de franchissement	Stade et/ou taille
1a	Eleotridae	Toutes espèces	Butis éléotris (F) / cabot noir, dormeur, ti-nèg, flèche (C)	Nage	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)
	Gobiidae hors Sicydiinae	Toutes espèces à l'exception des <i>Sicydiinae</i>	Toutes espèces à l'exception des <i>Sicydiinae</i>		
1b	Eleotridae	Toutes espèces	Butis, éléotris (F) / cabot noir, dormeur, ti-nèg, flèche (C)	Nage / Escalade	Juvénile (Lp < 40 mm)
	Gobiidae hors Sicydiinae	Toutes espèces à l'exception des <i>Sicydiinae</i>	Toutes espèces à l'exception des <i>Sicydiinae</i>		
2a	Mugilidae	Toutes espèces	Mulet (F) / mulet, chitte (C)	Nage / Saut	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)
2b					Juvénile (Lp < 100 mm)
2c	Kuhliidae	Toutes espèces	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (C)	Nage / Saut	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)
2d					Juvénile (Lp < 100 mm)
3a	Anguillidae	Toutes espèces	Anguille (F) / z'amab, z'anguille (C)	Nage / Reptation	Lp > 500 mm
3b					100 mm < Lp < 500 mm
3c				Nage / Reptation / Escalade	Lp < 100 mm
4a	Gobiesocidae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	Nage / Ventousage	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)
	Gobiidae Sicydiinae	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique jeune (F) (C)		
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à negeiores rouges (F)		
		<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)		
4b	Gobiesocidae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	Nage / Ventousage	Juvénile (Lp < 40 mm)
	Gobiidae Sicydiinae	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique jeune (F) (C)		
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)		
		<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)		
5a	Grapsidae	Toutes espèces	Crabe de rivière (F) (C)	Nage négligeable / Marche	Subadulte / Adulte
	Palaemonidae	Toutes espèces	Bouquet, chevrette, crevette, écrevisse (F) (C)		
5b	Atyidae	Toutes espèces	Bouc, caradine, chevaquine, crevette (F) (C)	Nage négligeable / Marche	Tout stade
	Grapsidae	Toutes espèces	Crabe de rivière (F) (C)		Juvénile
	Palaemonidae	Toutes espèces	Bouquet, chevrette, crevette, écrevisse (F) (C)		Juvénile
	Xiphocarididae	<i>Xiphocaris elongata</i>	Crevette (F) / pissette (C)		Tout stade

Tableau 9

Tableau récapitulatif des différents groupes d'espèces de poissons considérés dans le cadre de la présente méthode, et de leurs capacités de nage et de saut théoriques

Groupe ICE	Famille	Espèce	Principaux noms français (F) / créole (C)	Stade et/ou taille	Espèces et/ou stades sauteurs	Tirant d'eau minimum nécessaire pour la nage (h _{min})	V. sprint Umax associée (m/s)			Hauteur de saut associée (m)		
							Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
1a	Eleotridae	Toutes espèces	Butis éléotris (F) / cabot noir, dormeur, ti-nèg, flèche (C)	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	Non	0,05 m	1,50	2,25	3,00	-	-	-
	Gobiidae hors Sicydiinae	Toutes espèces à l'exception des Sicydiinae	Toutes espèces à l'exception des Sicydiinae									
1b	Eleotridae	Toutes espèces	Butis, éléotris (F) / cabot noir, dormeur, ti-nèg, flèche (C)	Juvénile (Lp < 40 mm)	Non	0,01 m	0,50	1,00	1,50	-	-	-
	Gobiidae hors Sicydiinae	Toutes espèces à l'exception des Sicydiinae	Toutes espèces à l'exception des Sicydiinae									
2a	Mugilidae	Toutes espèces	Mulet (F) / mulet, chitte (C)	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	Oui	0,05 m	3,00	4,50	6,00	0,40	0,90	1,60
2b				Juvénile (Lp < 100 mm)	Oui	0,05 m	2,00	2,50	3,00	0,20	0,30	0,40
2c	Kuhliidae	Toutes espèces	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (C)	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	Oui	0,10 m	2,50	4,25	6,00	0,30	0,90	1,60
2d				Juvénile (Lp < 100 mm)	Oui	0,05 m	1,00	1,75	2,50	0,10	0,20	0,30
3a	Anguillidae	Toutes espèces	Anguille (F) / z'amab, z'anguille (C)	Lp > 500 mm	Non	0,05 m	< 2,00			-	-	-
3b				100 mm < Lp < 500 mm	Non	0,02 m	< 1,50			-	-	-
3c				Lp < 100 mm	Non	-	< 0,50			-	-	-
4a	Gobiesocidae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / têtard, macouba, colle-roche (C)	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	Non	0,05 m	2,00	3,25	4,50	-	-	-
	Gobiidae Sicydiinae	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique jeune (F) (C)									
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)									
		<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)									
	<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)										
	<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)										
4b	Gobiesocidae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / têtard, macouba, colle-roche (C)	Juvénile (Lp < 40 mm)	Non	0,01 m	0,50	1,00	1,50	-	-	-
	Gobiidae Sicydiinae	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique jeune (F) (C)									
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)									
		<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)									
	<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)										
	<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)										



Rappels des définitions des classes de franchissabilité

L'objectif de la méthode ICE est de permettre aux opérateurs de déterminer l'impact potentiel d'une barrière sur la circulation des espèces en utilisant des critères simples, reposant sur la mise en œuvre de moyens humains et matériels légers.

Cette méthode repose sur la confrontation de la géométrie de l'ouvrage et des conditions hydrauliques à son niveau avec les capacités de franchissement des espèces de poissons et macro-crustacés considérées.

Bien que la démarche proposée dans ce guide se veuille la plus logique et la plus rigoureuse possible, elle demeure simplificatrice étant donnés :

- 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'espèces donné ;
- la complexité géométrique de certains obstacles (pouvant induire une grande hétérogénéité de conditions hydrauliques pour un débit donné) ;
- ainsi que la variabilité des conditions hydrologiques et thermiques en période de migration.

Dans ce contexte, et **comme pour la méthode proposée en France métropolitaine**, il est apparu préférable de raisonner en **cinq classes de franchissabilité**.

Tout d'abord quatre classes avec indices (0 ; 0,33 ; 0,66 et 1) ont été associées à un code couleur afin de faciliter la mise en œuvre de la méthodologie et sa compréhension.

Puis, **une classe indéterminée (NC) supplémentaire**, sans indice associé, représente les cas où une expertise plus poussée s'avère nécessaire pour évaluer l'indice de franchissabilité (ouvrages complexes...). Cette classe peut être utilisée dans l'attente d'une éventuelle expertise spécifique ultérieure.

Attention. Les quatre classes de franchissabilité (0 ; 0,33 ; 0,66 et 1) ne doivent en aucun cas être assimilées à des valeurs numériques et des taux de franchissement. Ces chiffres représentent d'avantage la nécessité d'actions de restauration au niveau de l'ouvrage.

La définition des classes de franchissabilité est donnée ci-après. Les critères et la démarche permettant de déterminer les classes de franchissabilité pour chaque type d'obstacle et groupe d'espèces seront détaillés ultérieurement.



Barrière totale (Classe ICE = 0) ●

La barrière est infranchissable pour les individus appartenant aux espèces / 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 ou des populations.

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

La barrière représente un obstacle majeur à la migration des individus appartenant aux espèces / stades du groupe considéré.

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

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

La barrière représente un obstacle significatif à la migration des individus appartenant aux espèces / 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 ou des populations. L'obstacle est néanmoins susceptible de provoquer des retards de migration non négligeables.

L'obstacle reste néanmoins infranchissable une partie de la période de migration pour une fraction significative de la ou des populations du groupe considéré.

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

La barrière ne représente pas un obstacle significatif à la migration des individus appartenant aux espèces / stades du groupe considéré.

La plus grande partie de la ou des populations est capable de la franchir dans un laps de temps court et sans dommage. Toutefois, 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'ouvrage n'est pas appréciable avec les seules données ICE. L'évaluation de l'impact nécessite des investigations complémentaires ou une analyse plus poussée.

N.B. Ce principe de notation peut être appliqué également au diagnostic à la dévalaison. Cependant, comme évoqué au chapitre décrivant les principes de la méthode ICE, dans le cadre de la démarche et 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 dédiée, menée par des techniciens spécialisés, s'impose alors.



Diagnostic de la franchissabilité à la montaison

- 
- 72 ■ Cas des éléments fixes des seuils et barrages
 - 110 ■ Cas des éléments mobiles associés à un ouvrage
 - 117 ■ Cas des ouvrages routiers et ferroviaires
 - 134 ■ Cas des ouvrages complexes ou mixtes
 - 137 ■ Le cas particulier de l'anguille
 - 146 ■ Le cas particulier du ventousage et de l'escalade par les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques
 - 152 ■ Le cas particulier de la marche par les macro-crustacés



Cas des éléments fixes des seuils et barrages

Les différentes configurations rencontrées

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

En fonction de la configuration du parement (Figure 31), plusieurs types de situations décrits ci-après peuvent être rencontrés.

Des chutes verticales ou quasi-verticales que le poisson ne peut franchir que grâce à d'éventuelles capacités spécifiques de franchissement (saut, reptation, ventousage et escalade) ou, s'agissant d'un macro-crustacé, par marche.

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 à ce niveau (sauf cas spécifique d'une chute de très faible hauteur pour laquelle l'écoulement peut produire un jet de surface).

NB. Ainsi, comme dans le cadre de la méthode ICE développée pour la métropole, **il sera globalement considéré qu'un seuil est vertical ou quasi-vertical dès lors que la pente du parement aval est supérieure à 150 % (56°).**

Des 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 maximale de nage U_{max} et endurance à cette vitesse) et les caractéristiques morphologiques (hauteur de corps du poisson) des espèces / stades ciblés.

Des configurations plus complexes comportant une succession de parties en pente et de parties plus ou moins verticales (présence de redans).

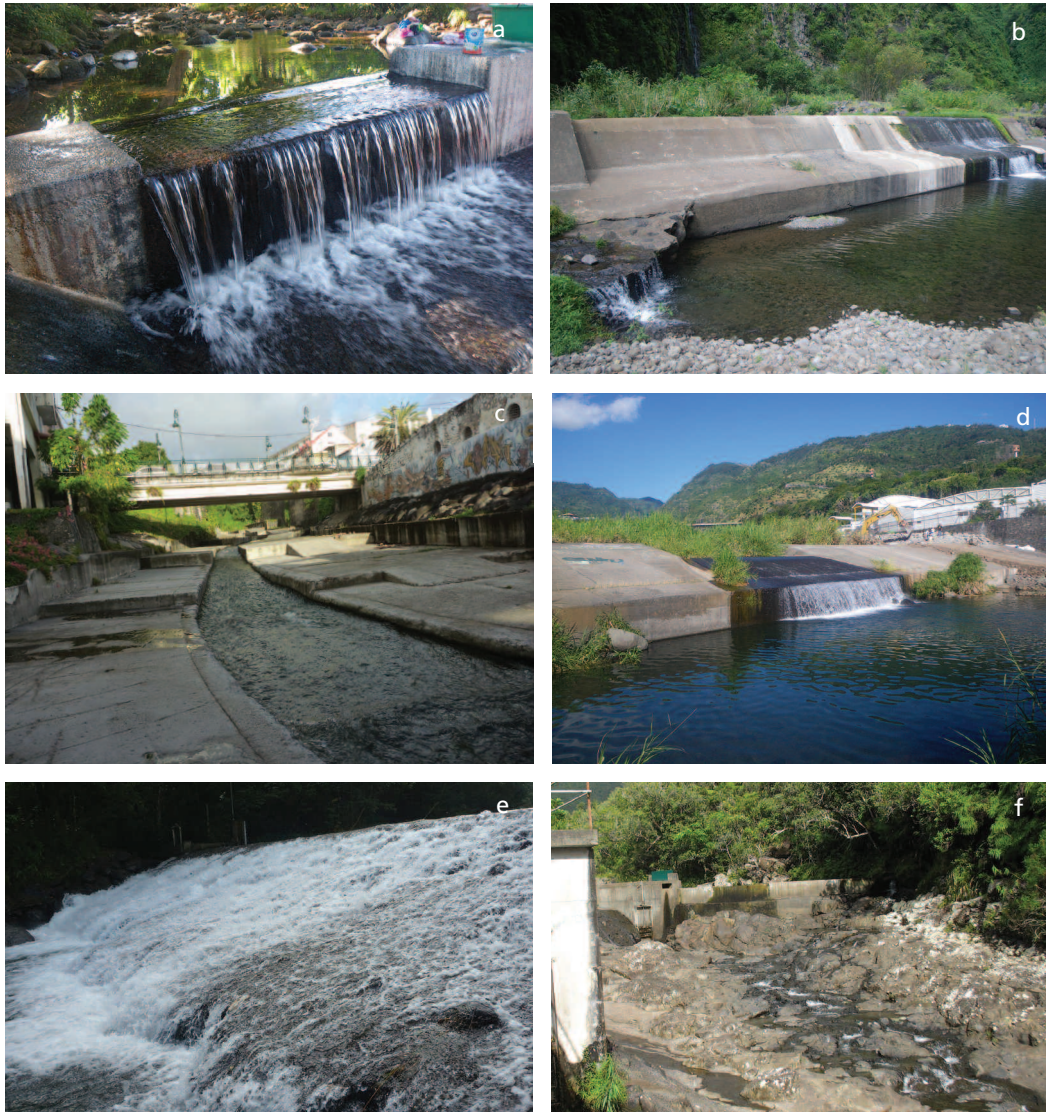
Un redan est un décrochement dans le parement du seuil venant briser la continuité du profil du seuil. La présence d'un ou plusieurs redans sur un seuil (seuil en escalier, présence d'une rehausse en crête de seuil...) peut significativement dégrader la franchissabilité d'un seuil, plus particulièrement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

Les parties fixes (déversoir, coursier) des seuils et barrages sont généralement construites en enrochements bétonnés ou en béton armé, et éventuellement protégées par un blindage acier sur les rivières à haut niveau de charriage (ex. : île de La Réunion). Toutefois, les différences de matériaux influencent assez peu les conditions d'écoulement (tirants d'eau et vitesses d'écoulement).



Attention. L'analyse des conditions hydrauliques sur les seuils en enrochements libres ou faiblement noyés dans le béton se révèle plus délicate que sur les seuils « classiques », étant donné la variabilité du mode d'organisation, des formes et des dimensions des blocs, d'autant que ces spécifications ne sont jamais très précises lors des travaux. Aussi, dans le cadre de la méthode ICE, des critères spécifiques à ces obstacles ont été définis.

Figure 31



a, b, c, d, e © B. Voegtli (Ecogea)
f © P. Valade (Ocea Consult)

Différentes configurations d'obstacles de types « seuil » ou « barrage ».

(a) Seuil vertical présentant un jet plongeant, (b) Seuil complexe présentant une chute aval et un coursier avec redan en amont, (c) Seuil incliné à faible pente, (d) Seuil incliné présentant une chute aval verticale, (e) Seuil incliné présentant une petite chute aval, (f) Seuil vertical poursuivi en aval par un coursier en enrochements liaisonnés au béton.

Les paramètres géométriques et 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), la configuration géométrique de la crête (qui conditionne 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 (qui déterminent l'évolution du tirant d'eau et de la vitesse d'écoulement sur le coursier) ;

■ lorsque l'ouvrage est en escalier, c'est-à-dire lorsqu'il est constitué de plusieurs marches verticales séparées par des parties horizontales ou inclinées, la configuration de l'écoulement ainsi que sa description deviennent plus complexes, et le passage du poisson généralement plus difficile.

La description et l'évaluation de la franchissabilité peuvent être plus difficiles lorsque l'ouvrage n'est pas homogène sur toute sa largeur.

Le degré de franchissabilité résulte 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 une classe de franchissabilité ICE 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 seuils à parement incliné qui, du fait de leur nature constructive, créent généralement des écoulements très hétérogènes.

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

Enfin, au vu de leurs capacités de franchissement spécifiques, il conviendra le cas échéant de se référer aux chapitres dédiés aux espèces qui utilisent la marche (macro-crustacés), la reptation (anguilles), l'escalade associée aux forces de tension superficielle (juvéniles de *Gobiidae*), et le ventousage (*Sicydiinae* notamment).

À noter que pour les seuils et barrages équipés de dispositifs de franchissement pour la faune diadrome, l'analyse de l'efficacité de ces dispositifs devra être traitée par des experts spécialisés dans les domaines du dimensionnement hydraulique de ces dispositifs et du comportement des espèces.

Les obstacles verticaux ou quasi-verticaux (pente > 150 %)

Critères de franchissabilité pour les espèces piscicoles sauteuses

Comme précisé au chapitre relatif aux capacités de franchissement des poissons, dès lors que la fosse en pied de chute est adaptée, 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 6 page 38). Dès lors que la hauteur et la longueur du saut sont suffisantes, les individus concernés pourront reprendre leur migration vers l'amont si la charge et les vitesses de courant à l'endroit où ils retombent (crête du seuil ou amont immédiat) ne sont pas limitants.

Définition des classes de franchissabilité

Sur la base du tableau 9 (chapitre précédent page 67), donnant les hauteurs de saut maximales théoriques associées à la classe de taille retenue pour l'espèce et le stade considérés (c.-à-d. pour le sous-groupe considéré), la classification suivante est proposée, 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 (DH_{\min}) associée à la taille minimale $L_{p\min}$ des poissons du sous-groupe considéré, 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}) du sous-groupe considéré, 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 de saut théoriques associées aux tailles « moyenne » $L_{p\text{moy}}$ (DH_{moy}) et maximale $L_{p\max}$ (DH_{\max}) du sous-groupe considéré, 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 (DH_{\max}) associée à la taille maximale $L_{p\max}$ des poissons du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière totale (Classe ICE = 0)**.

Critères de franchissabilité pour les espèces piscicoles nageuses, non sauteuses

Les obstacles verticaux ou quasi-verticaux provoquent généralement des chutes que les espèces piscicoles ne peuvent franchir qu'en faisant appel à leur potentielle capacité de saut (mises à part les spécificités de ventousage et d'escalade ou de reptation, respectivement pour les *Sicydiinae* ou les anguilles, abordées dans des chapitres dédiés).

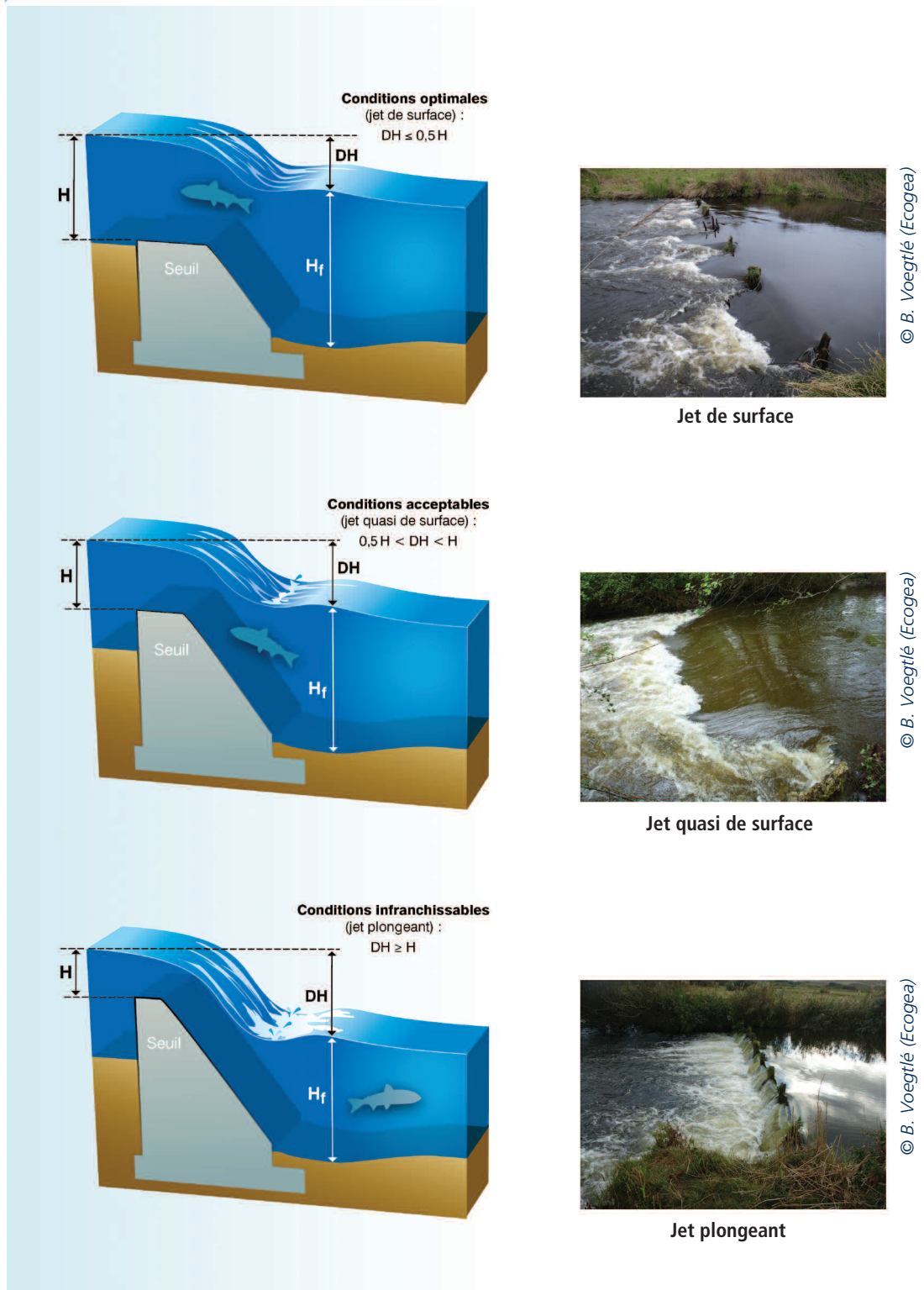
Les espèces peuvent toutefois franchir une chute verticale par la nage lorsque les conditions d'écoulement répondent à plusieurs critères (Figure 32 page 76), à savoir :

- **l'écoulement doit être « de surface »**. Ce type d'écoulement apparaît lorsque la chute (DH) est inférieure ou égale à 0,5 fois la charge H sur le seuil. Un jet quasi de surface ($0,5H < DH < H$) permet potentiellement d'assurer un franchissement par la nage, sans pour autant créer des conditions optimales ;
- **le tirant d'eau sur le seuil doit être suffisant pour permettre la nage du poisson**. Il sera considéré que cette condition est remplie dès lors que la charge H est supérieure ou égale à H_{\min} , critère défini dans le chapitre sur les capacités de franchissement des poissons ;
- **la profondeur de la fosse en pied de seuil (H_f) doit être suffisante** et doit répondre au critère ($H_f \geq H_{f\min}$) défini dans le chapitre 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 la condition bien évidemment que les autres critères soient respectés (écoulement de surface, profondeur de fosse et charge suffisantes) :

- si la vitesse de l'écoulement dans le jet créé par la chute (DH) est inférieure à la vitesse de sprint (U_{\max}) associée à la taille minimale des poissons ($L_{p\min}$) du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact limité (Classe ICE = 1)** ;
- si la vitesse de l'écoulement dans le jet créé 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 du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact significatif (Classe ICE = 0,66)** ;
- si la vitesse de l'écoulement dans le jet créé 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 du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact majeur (Classe ICE = 0,33)** ;
- si la vitesse de l'écoulement dans le jet créé par la chute (DH) est supérieure à la vitesse de sprint (U_{\max}) associée à la taille maximale ($L_{p\max}$) des poissons du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière totale (Classe ICE = 0)**.

Figure 32



Types de jets et conditions de franchissement par la nage au niveau d'un obstacle vertical ou quasi-vertical (pente > 150 %). D'après Baudoin et al., 2014.



Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Le tableau 10 présente les ordres de grandeur des profondeurs de fosse minimales ($H_{f_{min}}$) nécessaires au franchissement, en fonction de la hauteur de chute et de l'angle d'incidence du jet (ou de la pente du seuil).

Le tableau 11 (pages 78 et 79) récapitule, en fonction des espèces cibles, les différentes valeurs seuils permettant de déterminer la franchissabilité d'un seuil vertical ou quasi-vertical (pente > 150 %).

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 33 page 81) présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité.

Tableau 10

Ordre de grandeur de la profondeur minimale de fosse ($H_{f_{min}}$) nécessaire pour permettre au poisson de franchir un obstacle à parement vertical ou quasi-vertical (pente > 150 %), en fonction de la hauteur de chute (DH). D'après Baudoin et al., 2014

Chute DH (m)	Profondeur de fosse nécessaire ($H_{f_{min}}$) en pied de chute verticale ou quasi-verticale (> 150 %)
≤ 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

Tableau 11

Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité, par nage ou saut, de seuils verticaux ou quasi-verticaux (pente > 150 %)

Groupe ICE	Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom			
				Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion
1a	Eleotridae + Gobiidae hors Sicydiinae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X		
		<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X
		<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X
		<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X		
		<i>Dorminator maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nèg, dormeur (C)	X	X		
		<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X			
		<i>Eleotris klunzingerii</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X
		<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X
		<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X		
		<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X	
		<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X
		<i>Glossogobius kokius</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X
		<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X		
		<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X		
1b		<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X
		<i>Mugilogobius mertoni</i>	Gobi millet (C)			X	
		<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)			X	
		<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)			X	
		<i>Redigobius balteatus</i>	Gobie drapeau (F)			X	
		<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobi tase (C)			X	
		<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X
		2a	Mugilidae	<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)		
<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F) / millet (C)			X	X		
2b		<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X
2c	Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (F)			X	X
2d		<i>Kuhlia sauvagii</i>				X	X
3a	Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
3b		<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolore (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
3c		<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
		<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
		<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X		
4a	Gobiesocidae + Gobiidae	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X	
4b	Sicydiinae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	X	X		
		<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X		
		<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X		
		<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)			X	X

Les valeurs obtenues pour les groupes ou sous-groupes 1b, 3 et 4 correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage des espèces. Dans les cas où l'obstacle présente des zones de reptation, de ventousage ou d'escalade, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à ces capacités de franchissement (voir chapitres dédiés à ces cas particuliers).

Groupe ICE	Famille	Stade et/ou taille	Espèces et/ou stades sauteurs	Charge minimale sur l'obstacle (H _{min})	Valeurs seuils de chute (DH) pour le diagnostic de seuils à parement vertical ou quasi-vertical > 150 % (m)			
					Classe ICE			
					1	0,66	0,33	0
1a	Eleotridae + Gobiidae hors Sicydiinae	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	Non	0,05 m	≤ 0,15	]0,15 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	> 0,50
1b		Juvenile (Lp < 40 mm)	Non	0,01 m	-	≤ 0,10	]0,10 - 0,20]	> 0,20
2a	Mugilidae	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	Oui	0,05 m	≤ 0,40	]0,40 - 1,00]	]1,00 - 1,80]	> 1,80
2b		Juvenile (Lp < 100 mm)	Oui	0,05 m	≤ 0,20	]0,20 - 0,50]	]0,50 - 0,70]	> 0,70
2c	Kuhliidae	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	Oui	0,10 m	≤ 0,30	]0,30 - 0,90]	]0,90 - 1,60]	> 1,60
2d		Juvenile (Lp < 100 mm)	Oui	0,05 m	≤ 0,10	]0,10 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	> 0,50
3a	Anguillidae	Lp > 500 mm	Non	0,05 m	≤ 0,50	]0,50 - 0,70]	]0,70 - 0,90]	> 0,90
3b		100 mm < Lp < 500 mm	Non	0,02 m	≤ 0,20	]0,20 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	> 0,50
3c		Lp < 100 mm	Non	-	-	-	-	-
4a	Gobiesocidae + Gobiidae Sicydiinae	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	Non	0,05 m	≤ 0,20	]0,20 - 0,60]	]0,60 - 1,40]	> 1,40
4b		Juvenile (Lp < 40 mm)	Non	0,01 m	-	≤ 0,10	]0,10 - 0,20]	> 0,20

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité par nage ou par saut d'un obstacle à parement vertical ou quasi-vertical sont les décrites ci-après (Figure 33).

1. Analyse de la charge sur l'obstacle

Si la charge sur le seuil $H \geq H_{\min}$ (Tableau 11 pages 78 et 79), aller en 2 car la charge est suffisante.

Si $H < H_{\min}$, l'obstacle peut être considéré, dans ces conditions hydrologiques, comme une barrière totale au sens de la méthode 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 une charge suffisante. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site dans d'autres conditions hydrologiques.*

Attention. Pour le saut et dans le cas de petites chutes, la distance horizontale parcourue par le poisson lui permet généralement de tomber directement dans la retenue amont, dans une zone assez profonde présentant des vitesses d'écoulement réduites compatibles avec une reprise de nage efficace. Ceci est d'autant plus vrai que l'épaisseur de la crête du seuil est réduite. Aussi, si la chute à franchir est proche de DH_{\min} et que l'épaisseur de la crête du seuil n'est pas supérieure à la taille moyenne $L_{p_{\text{moy}}}$ des poissons, il pourra être fait abstraction de ce critère de charge minimale H_{\min} et aller directement en 2.

2. Analyse de la fosse en pied d'obstacle

Si la profondeur de la fosse en pied d'obstacle $H_f \geq H_{f_{\min}}$ (Tableau 10 page 77), alors la fosse est suffisante. Aller en 3.

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

3. Espèces sauteuses

Si le groupe d'espèces considéré est sauteur (Tableau 11 pages 78 et 79), aller en 5.

Sinon, aller en 4.

4. Type d'écoulement

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

Si $0,5H < DH \leq H$, alors l'écoulement peut être considéré comme à jet quasi de surface. L'ouvrage aura un impact pour les espèces considérées. La classe de franchissabilité ICE ne pourra en aucun cas excéder 0,66. Aller en 5 et retenir la classe de franchissabilité ICE du tableau 11 si elle est inférieure ou égale à 0,66 (sinon la classe retenue est 0,66).

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

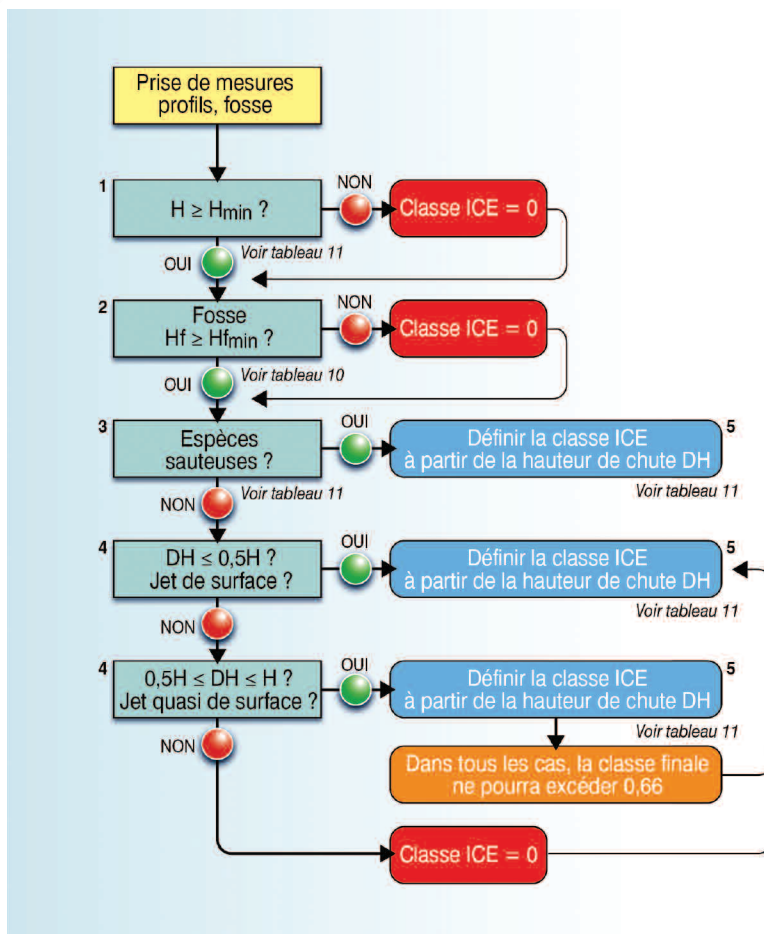
N.B. *Si l'écoulement se trouve proche des transitions entre écoulements plongeant, quasi de surface ou de surface, il peut être intéressant de poursuivre l'analyse et d'aller en 5 afin d'apprécier sommairement la classe de franchissabilité pour des conditions hydrologiques plus favorables (passage en écoulement de surface par noyage aval). Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site dans d'autres conditions hydrologiques.*

5. Analyse de la chute

À partir de la hauteur de chute DH puis du tableau 11, définir la classe de franchissabilité ICE de l'ouvrage.



Figure 33



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité piscicole ICE par nage ou saut au niveau d'un seuil 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 maximale de nage U_{max} , endurance à cette vitesse et hauteur de corps du poisson).

Critères de franchissabilité piscicole 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), sa rugosité et le débit par mètre de largeur (q).

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 tout au long de la portion (Figure 34, page 83). La distance à partir de laquelle l'écoulement devient uniforme augmente avec le débit unitaire (débit par mètre de largeur, q) et diminue avec la rugosité du parement.

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 ou présence de redan, des modélisations hydrauliques des conditions d'écoulement ont été effectuées à l'aide du logiciel *HEC-RAS* (développé par *US Army Corps of Engineers*) dans le cadre de l'élaboration de la méthode ICE en métropole (Baudoin *et al.*, 2014).

Les analyses ont été conduites sur un seuil associé à une chute de 5 m (Figure 35) 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 : 0,125, 0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 et 2,0 m³/s/m.

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.

À l'issue des modélisations hydrauliques, une cinquantaine de graphiques a été établie (voir trois exemples en Figure 36 page 84).

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, cette distance augmentant avec le débit unitaire et diminuant avec la rugosité.

À titre d'exemple, sur la figure 36a, 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. À cette distance, la vitesse devient constante et voisine de 4,5 m/s.

■ Modélisation de la franchissabilité piscicole

Les capacités de nage sont exprimées par la vitesse maximale de nage (U_{max}) et l'endurance (*t*) à cette vitesse maximale.

Le temps nécessaire (*dt*) 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)* puisse franchir une distance *dx* est :

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

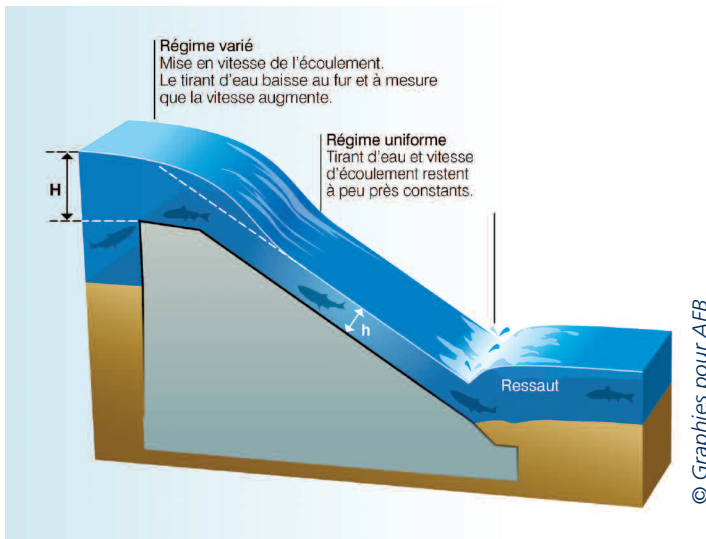
L'endurance requise *t(D)* pour franchir une distance *D* à partir de la crête peut alors s'exprimer par :

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

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*).

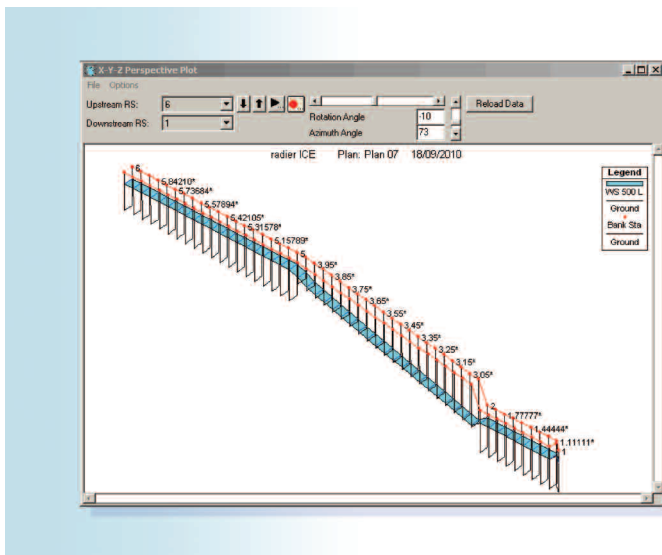


Figure 34



Évolution des conditions d'écoulement le long d'un coursier de seuil incliné. D'après Baudoin et al., 2014.

Figure 35

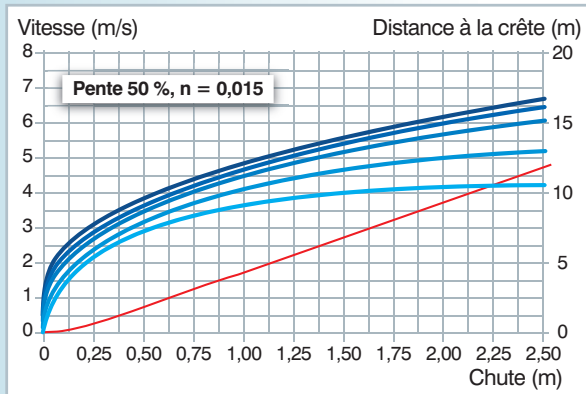
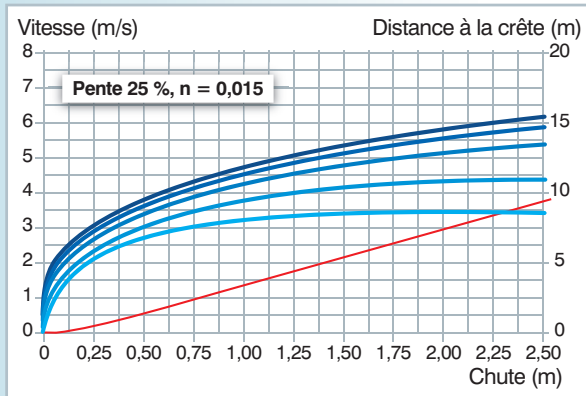
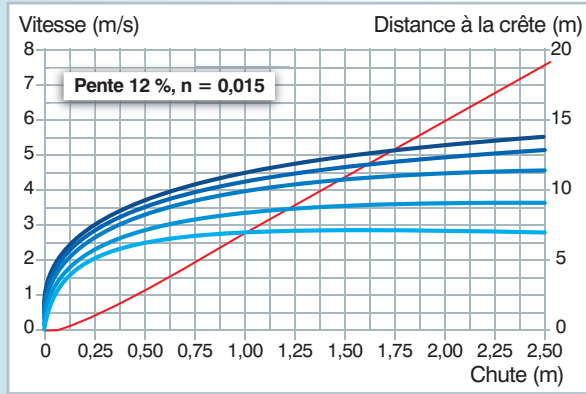


Extrait graphique d'une modélisation hydraulique effectuée sous HEC RAS. D'après Baudoin et al., 2014.

Ainsi, à partir des conditions hydrauliques obtenues par la 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 cette 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 (coefficients de Manning n de 0,01 à 0,06), ce qui représente environ 300 abaques similaires à celle de la figure 37 et 3 000 relations endurance / chute franchissable.



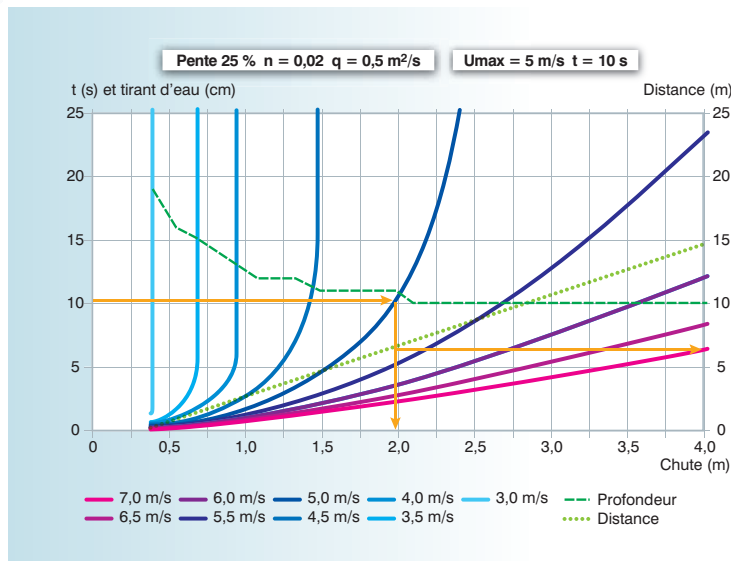
Représentation graphique montrant la relation entre la vitesse d'écoulement, la chute et la distance à la crête en fonction du débit unitaire (125 l/s/m à 1 000 l/s/m) pour une pente donnée (12 %, 25 % et 50 %) et une rugosité donnée du coursier (coefficient de Manning $n = 0,015$). D'après Baudoin et al., 2014.

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

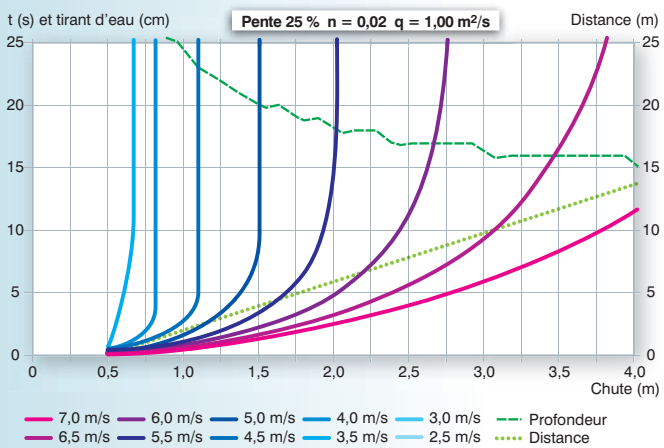
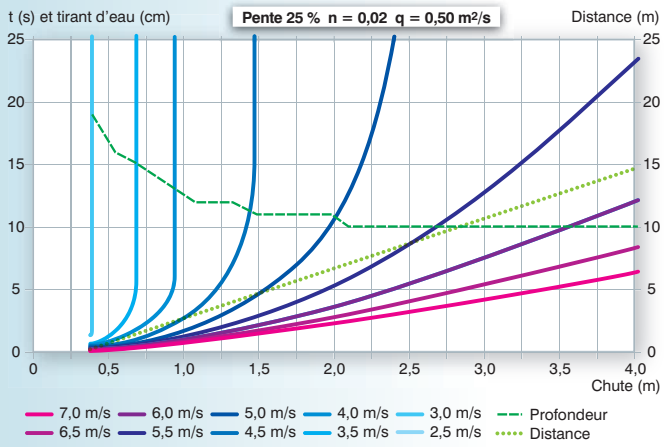
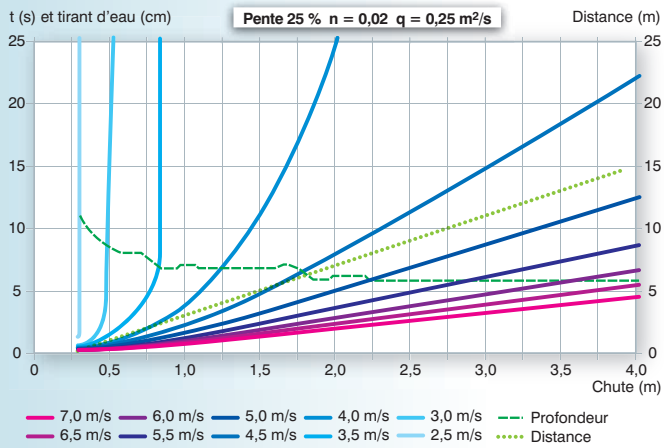
Cet abaque indique par exemple que, pour un poisson ayant une vitesse maximale de nage de $U_{\max} = 5 \text{ m/s}$ et une endurance de $t = 10 \text{ s}$, la chute franchissable est légèrement inférieure à 2 m et la distance franchissable de l'ordre de 6,5 m. Le tirant d'eau sur le radier (courbe en pointillé sur l'abaque) 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 37



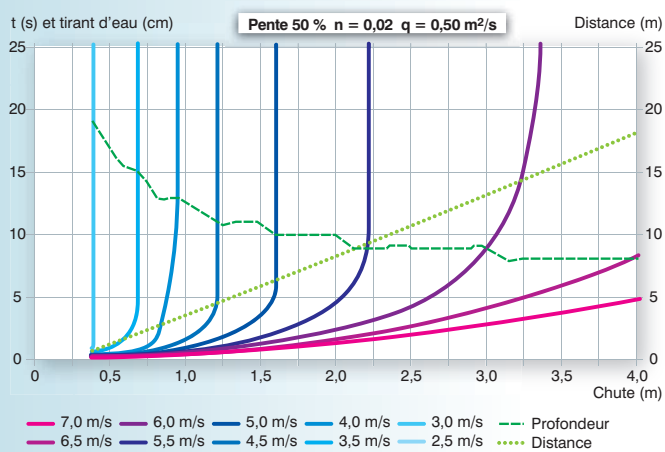
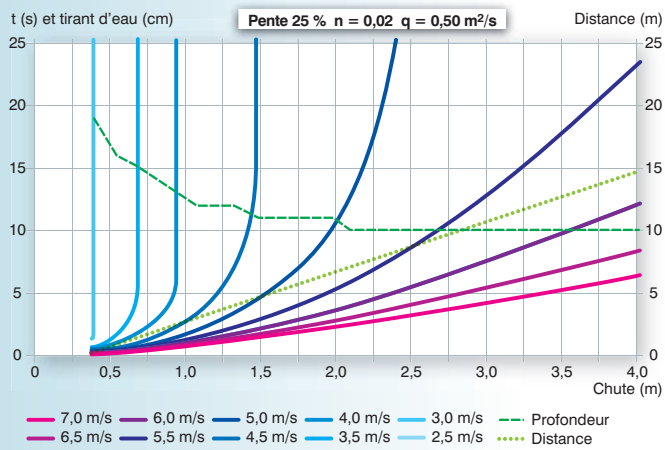
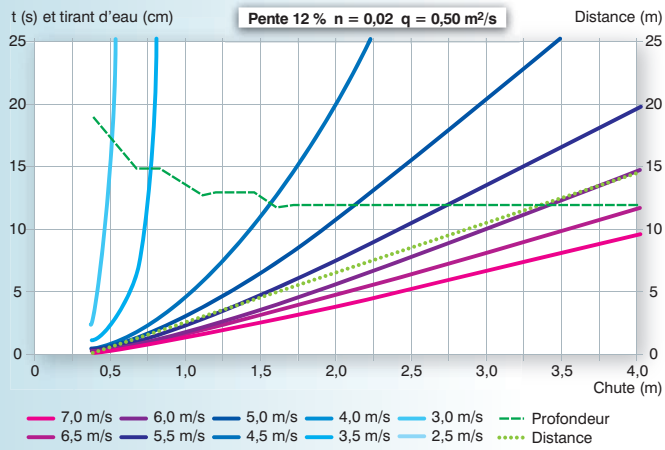
Relation entre la chute franchissable par la nage par un poisson, sa vitesse maximale de nage et son endurance (pente = 25 %, rugosité $n = 0,020$, débit unitaire $q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$). D'après Baudoin et al., 2014.

Les abaques présentés en figures 38, 39 et 40 (pages suivantes) permettent de visualiser l'influence du débit unitaire, de la pente et de la rugosité du coursier sur les chutes et distances franchissables par la nage pour les poissons.

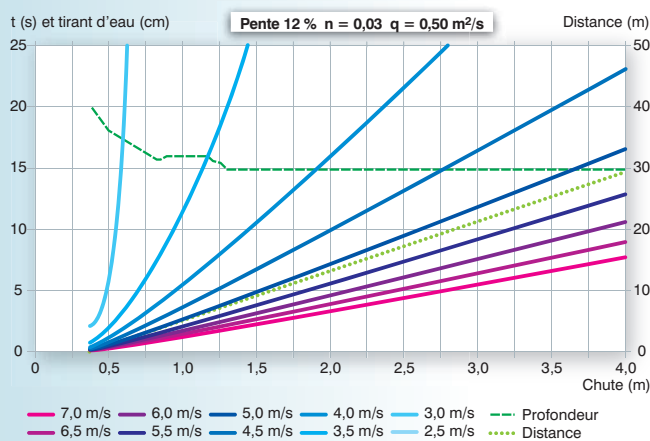
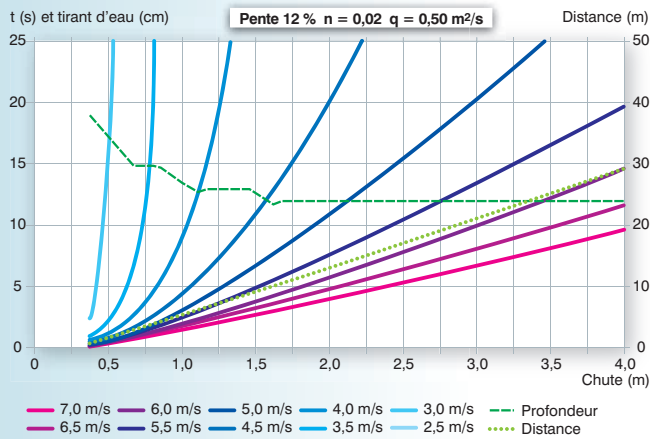
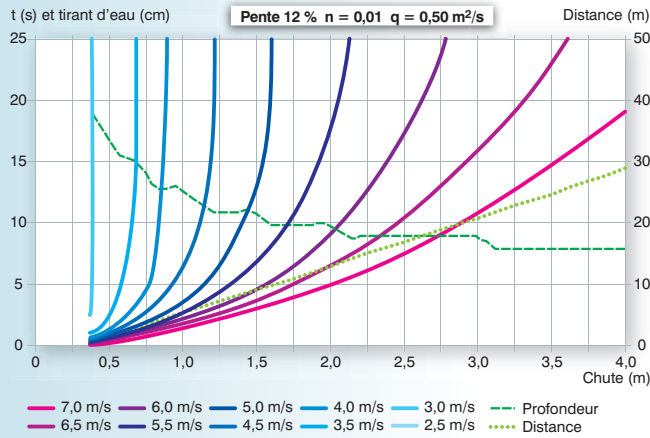


Évolution des chutes franchissables par la nage par un poisson en fonction de sa vitesse maximale de nage (U_{max}) et de son endurance (t), pour un coursier donné (pente 25 %, rugosité $n = 0,020$). Les trois abaques correspondent à 3 débits unitaires différents ($q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s/m}$, $q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s/m}$ et $q = 1,0 \text{ m}^3/\text{s/m}$). D'après Baudoïn et al., 2014.





Évolution des chutes franchissables par la nage par un poisson en fonction de sa vitesse maximale de nage (U_{max}) et de son 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 ($n = 0,020$). D'après Baudoin et al., 2014.



Évolution des chutes franchissables par la nage par un poisson en fonction de sa vitesse maximale de nage (U_{max}) et de son endurance (t), pour un débit unitaire donné ($q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) et un coursier de pente constante (12 %). Les trois abaques correspondent à des coursiers de rugosités variables ($n = 0,010$, $n = 0,020$ et $n = 0,030$). D'après Baudoin et al., 2014.



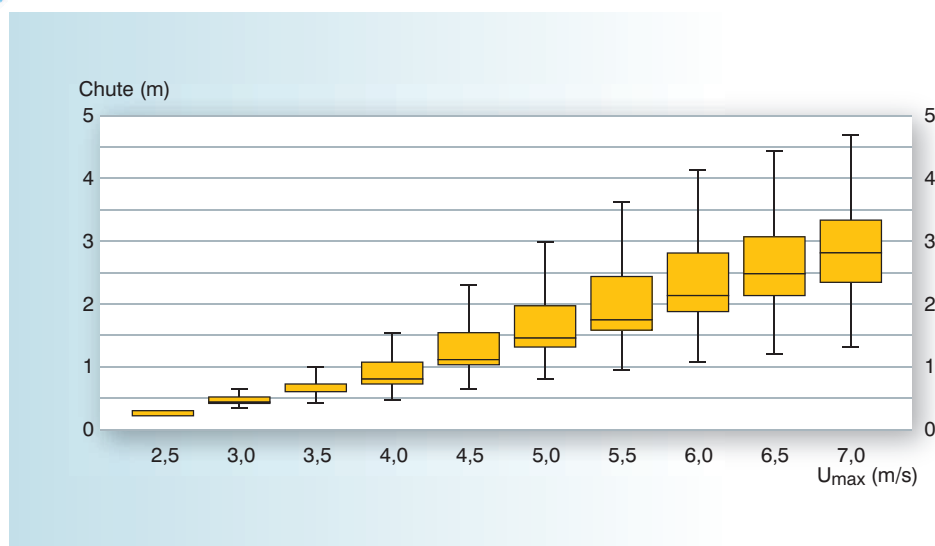
■ Analyse statistique des résultats

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 poisson comprises entre 10 s et 20 s (endurance généralement associée à la vitesse de sprint des poissons, quelles que soient les espèces ; voir parties précédentes).

Il apparaît que pour des poissons nageant à une vitesse maximale U_{max} donnée (endurance de 10 à 20 s), la chute franchissable est dans une très large mesure déterminée par cette vitesse maximale de nage (Figures 38 à 40 pages 86 à 88). 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 41 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 41



Évolution des chutes franchissables en fonction de la vitesse maximale de nage du poisson (U_{max}) en considérant une endurance comprise entre 10 et 20 s, quels que soient les autres paramètres (pente du coursier, rugosité du coursier, débit unitaire). D'après Baudoin et al., 2014.

■ Définition des classes de franchissabilité

En rapprochant les conditions hydrauliques sur le coursier (vitesses moyennes, tirants d'eau en fonction des débits unitaires et de la pente) et les capacités de nage des différentes espèces ou groupes d'espèces (vitesses de nage associées à la classe de taille retenue $L_{p_{min}}$, $L_{p_{moy}}$ et $L_{p_{max}}$), il devient possible de déterminer, pour chaque espèce ou groupe d'espèce, 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 les cotes des 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 ($L_{p_{min}}$, $L_{p_{moy}}$ et $L_{p_{max}}$).

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 (aux conditions bien évidemment que le tirant d'eau sur le seuil et la profondeur de fosse soient suffisantes) :

- si la hauteur de chute DH est franchissable pour les poissons présentant la taille minimale $L_{p_{min}}$ du sous-groupe considéré, 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 $L_{p_{min}}$ et moyenne $L_{p_{moy}}$ du sous-groupe considéré, 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 $L_{p_{max}}$ du sous-groupe considéré, 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 $L_{p_{max}}$ du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière totale (Classe ICE = 0)**.

Redans sur le seuil

Un redan (ou redent) est un décrochement dans le parement du seuil venant briser la continuité du profil de ce seuil (Figures 42 et 43).

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 42



Exemples de redans au niveau de seuils inclinés.

(a) Exemple de seuil avec redan (rivière Boungoumouhé, Mayotte), (b) Exemple de seuil avec redan (Rivière Blanche, Martinique)

a © B. Voegtli (Ecogea)
b © P. Valade (Ocea Consult')

Un redan peut induire deux types d'écoulement (Figure 43) :

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

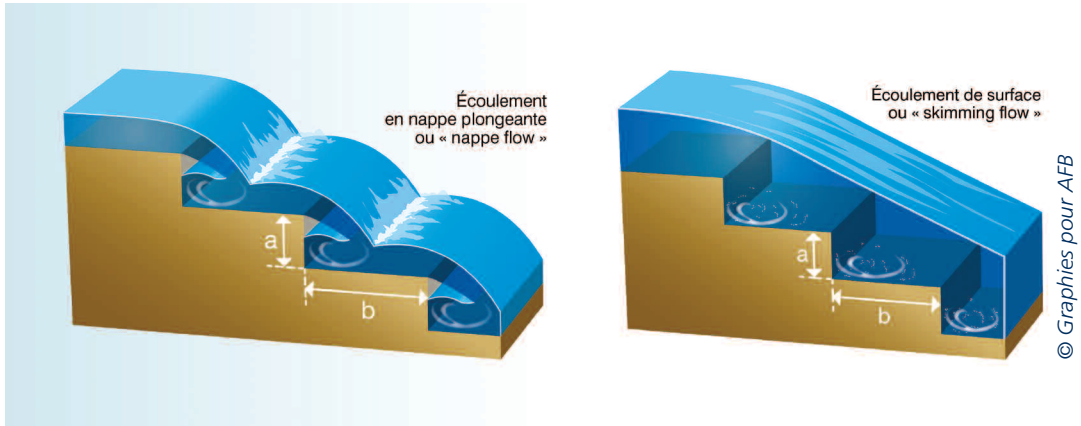
Un redan est caractérisé par sa hauteur (a) et sa longueur horizontale ou quasi-horizontale (b).

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

La figure 44 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.

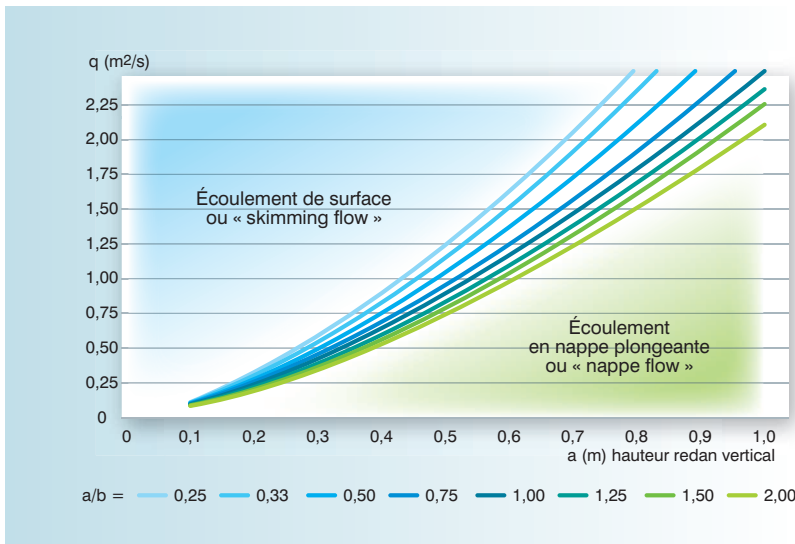


Figure 43



Écoulement en nappes plongeantes (ressauts) et écoulement de surface au niveau de seuils présentant des redans. D'après Baudoin et al., 2014.

Figure 44



Transition entre un écoulement avec ressaut et un écoulement de surface en fonction du débit unitaire et des caractéristiques du redan. D'après Yasuda et Ohtsu (1999) et modifié par Baudoin et al., 2014.

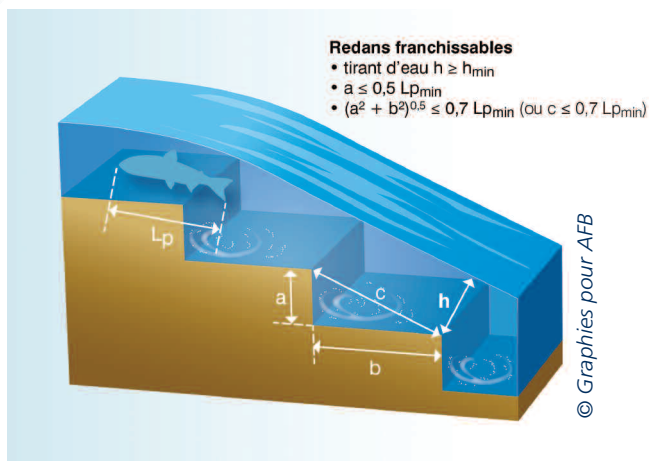
Il a été considéré qu'un poisson ne peut franchir un redan que par la nage, et seulement si les exigences suivantes sont remplies (Figure 45, page 92) :

- l'écoulement est de type **skimming flow** (redan effacé, écoulement apparenté à un écoulement de surface) ;
- la longueur du poisson (L_p de l'espèce ou du sous-groupe considéré) est suffisante par rapport aux dimensions du décrochement. Il faut alors vérifier les deux conditions suivantes :

$$a \leq 0,5 L_p \text{ et } (a^2 + b^2)^{0,5} \leq 0,7 L_p \text{ (soit } c \leq 0,7 L_p)$$

En pratique, il suffit de vérifier la seconde condition puisque la première (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 45



Conditions nécessaires pour qu'un redan soit franchissable. D'après Baudoin et al., 2014.

N.B. La position du redan sur le radier peut influencer le franchissement de façon différente en fonction des débits transitant par l'obstacle. Par exemple, 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 de la méthode ICE, il faut considérer la présence d'un redan 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 %.

Si le tirant d'eau sur un redan donné est supérieur à deux fois sa hauteur ($h \geq 2a$), ce redan sera considéré comme négligeable et l'on ne prendra pas en compte sa présence 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 46 et 47).

La chute aval doit alors être analysée globalement comme un seuil à parement vertical ou quasi-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 12, et selon la même méthodologie que celle adoptée pour les ouvrages complexes ou mixtes (voir chapitre dédié aux ouvrages complexes).

Figure 46

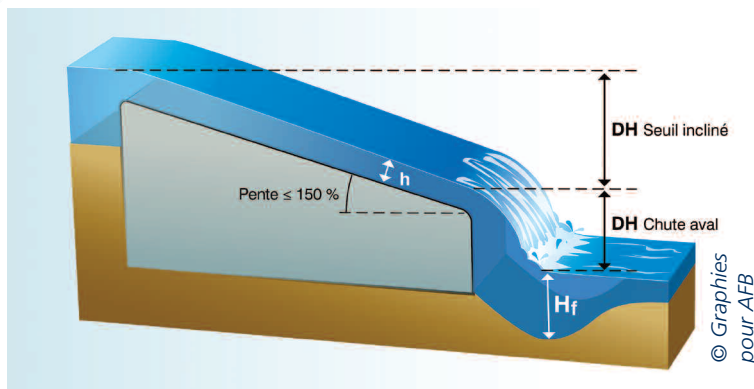


Schéma de principe d'un seuil incliné avec chute aval. D'après Baudoin et al., 2014.

Figure 47



Écoulement sur un parement incliné présentant une chute aval.
(a) Grande Rivière à Goyaves (Guadeloupe), (b) Passage à gué de Moala sur l'Ourovéni (Mayotte).

a © B. Voegtli (Ecogea)
b © P. Valade (Ocea Consult')

Tableau 12 Détermination de la classe de franchissabilité ICE globale d'un ouvrage combinant un seuil à parement incliné et une chute aval. D'après Baudoin et al., 2014

		Classe ICE de la chute aval			
		0	0,33	0,66	1
Classe ICE du seuil incliné	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 13 présente les hauteurs de fosse minimales ($H_{f_{min}}$) nécessaires, en fonction de la hauteur de chute et de l'angle d'incidence du jet (ou de la pente du coursier).

Le tableau 14 (pages 94 et 95) récapitule, en fonction des espèces cibles, les différentes valeurs seuils permettant de déterminer la franchissabilité d'un seuil à parement incliné (pente $\leq 150\%$) ; notamment les dimensions des redans, les tirants d'eau et les hauteurs de chute associées aux différentes classes de franchissabilité.

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 48 page 97) présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité.

Tableau 13 Ordre de grandeur de la profondeur de fosse minimale ($H_{f_{min}}$) nécessaire pour permettre au poisson de franchir par la nage un obstacle à parement incliné (pente $\leq 150\%$)

Chute DH (m)	Inclinaison du jet (ou pente du parement du seuil)			
	≤ 25 %	]25 % - 50 %]	]50 % - 100 %]	]100 % - 150 %]
≤ 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

Tableau 14 Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité de seuils à parement incliné (pente ≤ 150 %)

Groupe ICE	Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom			
				Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion
1a	Eleotridae + Gobiidae hors Sicydiinae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X		
		<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X
		<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X
		<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X		
		<i>Dorminator maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nèg, dormeur (C)	X	X		
		<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X			
		<i>Eleotris klunzingerii</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X
		<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X
		<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X		
		<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X	
		<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X
		<i>Glossogobius kokius</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X
		<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X		
		<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X		
1b		<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X
		<i>Mugilogobius mertonii</i>	Gobi millet (C)			X	
		<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)			X	
		<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)			X	
		<i>Redigobius balteatus</i>	Gobie drapeau (F)			X	
		<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobi tase (C)			X	
		<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X
2a	Mugilidae	<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)			X	
		<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F) / millet (C)	X	X		
2b		<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X
2c	Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (F)			X	X
		<i>Kuhlia sauvagii</i>				X	X
3a	Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
		<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolor (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
		<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
		<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
3c		<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X		
4a	Gobiesocidae +	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X	
4b	Gobiidae Sicydiinae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	X	X		
		<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X		
		<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X		
		<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)			X	X

Les valeurs obtenues pour les groupes ou sous-groupes 1b, 3 et 4 correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage des espèces. Dans les cas où l'obstacle présente des zones de reptation, de ventousage ou d'escalade, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à ces capacités de franchissement (voir chapitres dédiés à ces cas particuliers).



Groupe ICE	Familie	Stade et/ou taille	Espèces et/ou stades sauteurs	Tirant d'eau minimum nécessaire pour la nage (h_{\min})	Dimensions maximales des redans (m)		Valeurs seuils de chute (DH) pour le diagnostic de seuils à parement incliné $\leq 150\%$ (m)			
					a_{\max}	c_{\max}	Classe ICE			
							1	0,66	0,33	0
1a	Eleotridae + Gobiidae hors Sicydiinae	Subadulte / Adulte ($L_p > 40$ mm)	Non	0,05 m	0,10	0,10	$\leq 0,15$	]0,15 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	$> 0,50$
1b		Juvenile ($L_p < 40$ mm)	Non	0,01 m	0,02	0,02	-	$\leq 0,10$	]0,10 - 0,20]	$> 0,20$
2a	Mugilidae	Subadulte / Adulte ($L_p > 100$ mm)	Oui	0,05 m	0,10	0,15	$\leq 0,40$	]0,40 - 1,00]	]1,00 - 1,80]	$> 1,80$
2b		Juvenile ($L_p < 100$ mm)	Oui	0,05 m	0,02	0,05	$\leq 0,20$	]0,20 - 0,50]	]0,50 - 0,70]	$> 0,70$
2c	Kuhliidae	Subadulte / Adulte ($L_p > 100$ mm)	Oui	0,10 m	0,10	0,20	$\leq 0,30$	]0,30 - 0,90]	]0,90 - 1,60]	$> 1,60$
2d		Juvenile ($L_p < 100$ mm)	Oui	0,05 m	0,02	0,05	$\leq 0,10$	]0,10 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	$> 0,50$
3a	Anguillidae	$L_p > 500$ mm	Non	0,05 m	0,40	0,70	$\leq 0,50$	]0,50 - 0,70]	]0,70 - 0,90]	$> 0,90$
3b		$100 \text{ mm} < L_p < 500 \text{ mm}$	Non	0,02 m	0,10	0,20	$\leq 0,20$	]0,20 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	$> 0,50$
3c		$L_p < 100$ mm	Non	-	-	-	-	-	-	-
4a	Gobiesocidae + Gobiidae Sicydiinae	Subadulte / Adulte ($L_p > 40$ mm)	Non	0,05 m	0,05	0,10	$\leq 0,20$	]0,20 - 0,60]	]0,60 - 1,40]	$> 1,40$
4b		Juvenile ($L_p < 40$ mm)	Non	0,01 m	0,02	0,02	-	$\leq 0,10$	]0,10 - 0,20]	$> 0,20$

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité par nage d'un obstacle à parement aval incliné sont décrites ci-après.

1. Analyse de l'éventuelle chute aval

S'il n'y a pas de chute aval, aller directement en 2.

S'il existe une chute (pente > 150 %) en aval du seuil incliné, il faut alors analyser la franchissabilité de la chute selon la méthode d'évaluation présentée au chapitre dédié aux obstacles verticaux ou quasi-verticaux (commencer l'analyse au point 3 « *Espèces sauteuses* » de l'arbre décisionnel).

Si la chute aval est totalement infranchissable pour le groupe d'espèces ciblé, alors l'obstacle est considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

Si la chute aval n'est pas totalement infranchissable, aller en 2.

2. Analyse de la fosse en pied d'obstacle

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 doit être vérifiée.

Elle doit être suffisante au sens de la démarche appliquée aux chutes verticales (voir point 2 « analyse de la fosse » de l'arbre décisionnel des obstacles verticaux ou quasi verticaux, pente > 150 %), en considérant la hauteur de chute créée par la chute aval ($DH_{\text{chute aval}}$). Si $H_f \geq H_{f_{\min}}$ (Tableau 10 page 77), la profondeur de fosse est suffisante, aller en 3. Si $H_f < H_{f_{\min}}$, l'obstacle peut alors être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

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 la profondeur de la fosse en pied d'obstacle doit être vérifiée à partir du tableau 13, 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 $H_f \geq H_{f_{\min}}$ (Tableau 13 page 93), la profondeur de fosse est suffisante, aller en 3. Si $H_f < H_{f_{\min}}$, l'obstacle peut alors être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

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

Si $h \geq h_{\min}$ (Tableau 14 pages 94 et 95), alors le tirant d'eau est suffisant. Aller en 4.

Si $h < h_{\min}$, l'obstacle peut être considéré, dans ces conditions hydrologiques, comme une barrière totale au sens de la méthode ICE (Classe ICE = 0). *Il convient toutefois de poursuivre l'analyse (aller en 4) 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 sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site dans d'autres conditions hydrologiques.*

4. 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 5.

Si une des dimensions (a ou c) d'un seul des redans présents dépasse la valeur maximale a_{\max} ou c_{\max} (Tableau 14), 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 (a_{\max} et c_{\max} , Tableau 14), aller en 5.



5. Analyse de la chute du seuil à parement incliné

À 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), puis du tableau 14, définir la classe de franchissabilité ICE du seuil à parement incliné.

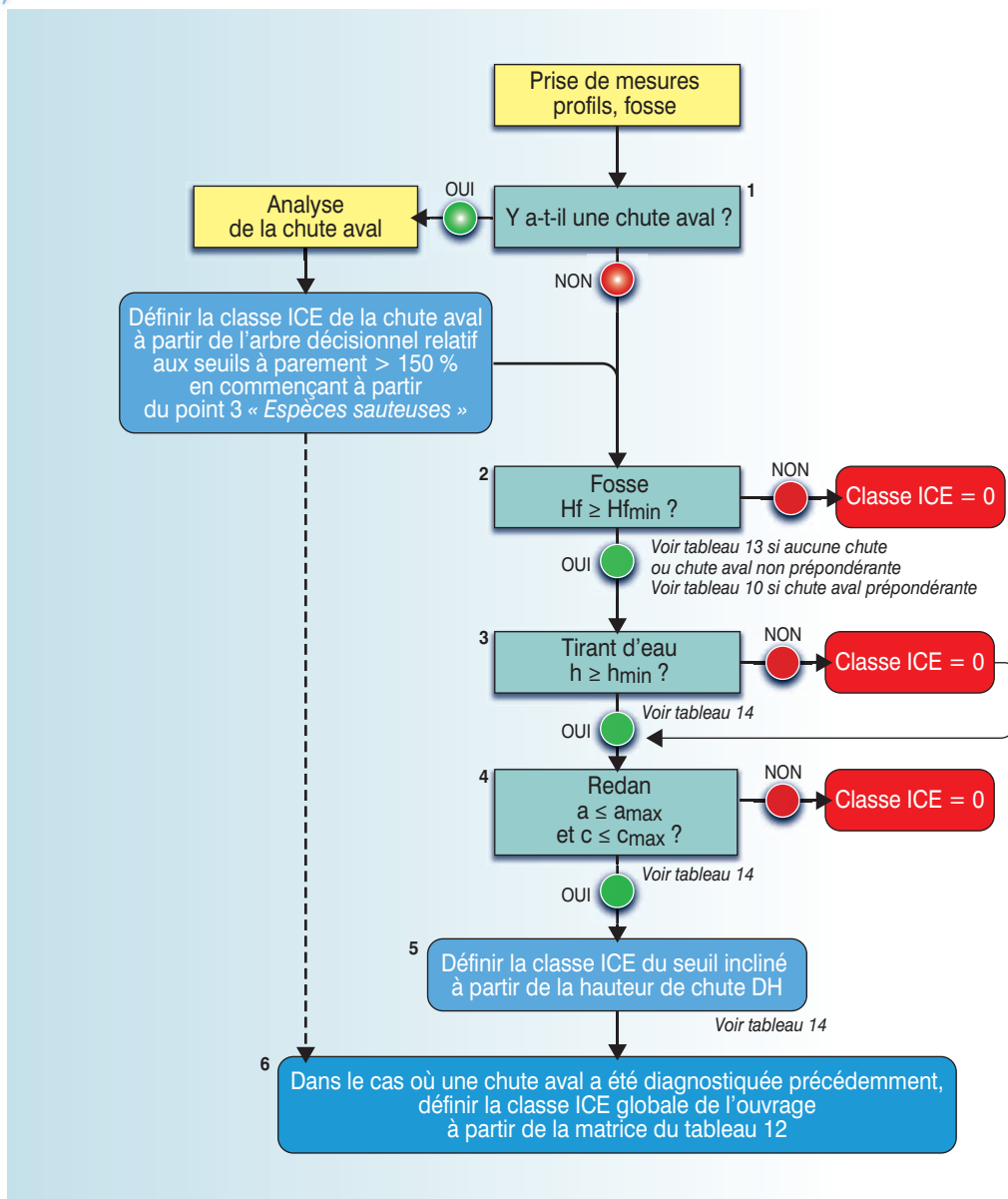
Puis aller en 6.

6. Analyse de la franchissabilité globale de l'ouvrage

Si le seuil incliné présente une chute aval, définir la classe de franchissabilité ICE globale de l'ouvrage à partir du tableau 12.

Si l'ouvrage ne présente pas de chute aval, alors la classe de franchissabilité ICE globale sera celle obtenue pour l'ouvrage à l'issue de l'étape 5.

Figure 48



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

Le cas particulier des seuils en enrochements

Généralités

En outre-mer, 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 plusieurs mètres (Figure 49).

Suivant la configuration des sites (caractéristiques physiques, hydrauliques), il est possible de rencontrer plusieurs types d'agencement des enrochements. Ce type de seuil peut par exemple 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 de l'ouvrage, la pente du coursier peut 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.

Suivant les cas, les enrochements peuvent être soit libres, soit jointoyés au béton ou au bitume.

Figure 49



a © P. Valade (Ocea Consult*)
b, c, d © B. Voegtli (Ecogea)

Exemples de seuils en enrochements dans les départements insulaires d'outre-mer.

(a) Seuil en enrochements en aval d'un seuil de prise (Captage du bras des Lianes, Réunion), (b) Seuil de stabilisation en enrochements liaisonnés (rivière des Galets, Réunion), (c) Seuil en enrochements franchissable par conception pour certaines espèces, couplé à une passe à bassins (Grand'Rivière, Martinique), (d) Écoulements sur la roche naturelle pouvant s'apparenter à un seuil en enrochements (Mayotte).

Problématiques hydrauliques et piscicoles

Comme pour un seuil à parement incliné (voir chapitre dédié 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. Plus le coursier est rugueux et le débit unitaire (q) faible, plus la longueur avant l'établissement du



régime uniforme est courte. Elle est de l'ordre de 3 à 4 mètres pour des débits unitaires de 1 à 2 m³/s/m.

Les 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.

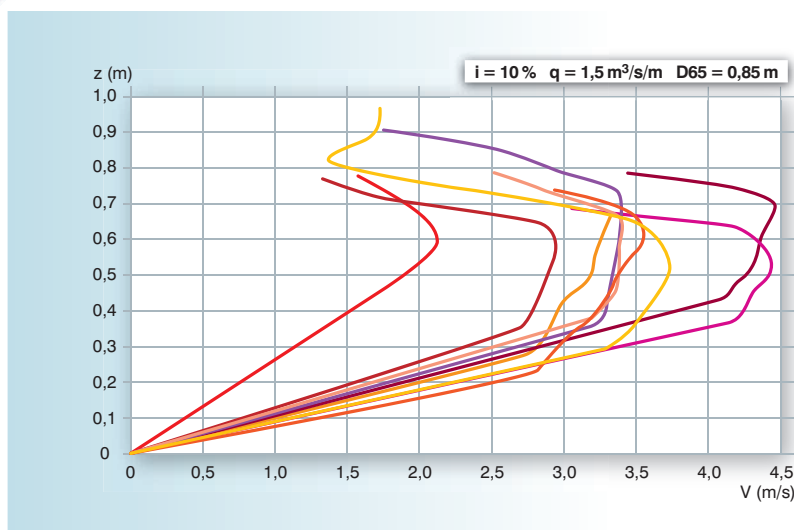
Les conditions d'écoulement (tirants d'eau, vitesses, formes d'écoulement) sont déterminées par la pente du coursier, la longueur du coursier (ou la chute), le débit unitaire et la rugosité de la paroi, qui dépend elle-même de la taille et de la forme des blocs, de leur agencement et de l'existence ou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

L'analyse des conditions hydrauliques au niveau des seuils en enrochements se révèle bien plus difficile que pour des seuils « classiques » étant donné la variabilité du mode d'organisation, des formes et des dimensions des blocs, d'autant plus que ces spécifications ne sont jamais très précises lors des travaux.

Par ailleurs, compte tenu de la taille des blocs, il est impossible, comme dans le cas des seuils « classiques » (voir chapitre dédié aux seuils à parement aval incliné de pente ≤ 150 %), d'effectuer une analyse des conditions d'écoulement par modélisation hydraulique, les blocs constituant des rugosités dont les dimensions sont du même ordre de grandeur (voire plus importantes) que les profondeurs d'eau, en particulier dans les conditions hydrologiques généralement rencontrées en période de migration du poisson.

À titre d'illustration, la figure 50 présente des profils de vitesses mesurés pour un débit unitaire de 1,5 m³/s/m sur une rampe en enrochements ($D_{65} = 0,85$ m) de pente 10 % (Larinier *et al.*, 2006). Les différents profils présentés, 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 50



Exemple de profils de vitesses sur une rampe en enrochements jointifs ($D_{65} = 0,85$ m) présentant une pente de 10 %. D'après Larinier *et al.* (2006).

Pour une taille donnée d'individus au sein d'une espèce ou d'un groupe d'espèces cible, la franchissabilité d'un seuil en enrochements dépend des vitesses d'écoulement, des hauteurs d'eau (entre et/ou au-dessus des enrochements), de la « qualité hydraulique » de la lame d'eau (absence de ressauts, de décollement...) ainsi que de la distance à franchir (Figure 51 page 100).

Deux facteurs sont limitants :

- pour les faibles débits unitaires (q), 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, 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 d'une seule traite. 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 (Figure 51).

Figure 51



Qualité d'écoulements entre enrochements.

(a) Écoulement sur un seuil en enrochements jointoyés au béton, pour une pente de 12 % : les espèces ont la possibilité de passer assez aisément dans les zones marginales à faible débit, les espaces interblocs constituant des mini-bassins, (b) Écoulement sur un seuil en enrochements pour une pente > 20 % : la présence de ressauts et de chutes locales, sans fosses d'appel entre les blocs, sont susceptibles de constituer autant de points de blocage pour le franchissement des poissons.

a, b © M. Larinier (Pôle Ecohydraulique)

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, 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 (valeurs moyennes qui, par ailleurs, ne seraient pas représentatives des conditions hydrauliques locales et n'auraient pas un grand intérêt pour une analyse précise des conditions de franchissabilité).

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 hydraulique 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 de la mise en place d'une méthode 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. Elles ne peuvent généralement pas être effectuées en conditions de débits moyens et forts.



Critères et classes de franchissabilité

Compte tenu des difficultés techniques à réaliser des relevés précis sur ce type d'ouvrage et de l'impossibilité à réaliser des modélisations hydraulique et physique, il est apparu difficile de proposer des critères d'évaluation de la franchissabilité.

Dans le cadre de la présente méthode, il est proposé de vérifier dans un premier temps l'existence d'une voie de passage potentielle pour le poisson, puis d'apprécier la 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 d'évaluation de la franchissabilité ont ainsi 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 du retour d'expériences acquis en France métropolitaine et à l'étranger.

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

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

Au vu de l'hétérogénéité des écoulements, nettement marquée sur les seuils en enrochements, il est proposé ici de vérifier l'existence d'une voie de passage potentielle 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 zone de blocage (absence de ressauts hydrauliques ou de chutes brutales).

Plus la pente moyenne du coursier est importante, plus le débit unitaire (q) doit être élevé 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 car 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) qu'à la condition que la hauteur et la disposition des blocs n'induisent pas localement de chutes infranchissables.

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

Les valeurs de tirant d'eau minimal pour les seuils en enrochements ($h_{\min \text{ enroch}}$) sont présentées dans le tableau 15.

Tableau 15

*Tirant d'eau minimal ($h_{\min \text{ enroch}}$) permettant le franchissement des seuils en enrochements par la nage, en fonction de la pente moyenne du seuil. Modifié d'après Baudoin *et al.*, 2014*

Pente moyenne du seuil	≤ 5 %	]5 % - 7 %]	]7 % - 9 %]	]9 % - 11 %]	]11 % - 13 %]	]13 % - 15 %]
$h_{\min \text{ enroch}}$ (cm)	10	15	20	25	30	40

Ces valeurs de tirants d'eau sont à prendre comme des valeurs minimales 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 de corps des individus).

■ Définition de la 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 maximales de nage et de l'endurance de l'espèce considérée à ces vitesses.

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

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

avec :

V_m est la vitesse moyenne de l'écoulement (en m/s) ;

h_m est le tirant d'eau (en m) ;

d_{84} est la valeur de diamètre qui n'est pas dépassée pour 84% des blocs d'enrochements constituant le seuil (en m) ;

l est la 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 chapitre dédié aux seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150\%$) ou les ouvrages routiers ou ferroviaires (voir chapitre dédié à 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 chapitre dédié au principe de l'évaluation des ouvrages routiers ou ferroviaires), il est alors possible, pour chaque espèce ou groupe d'espèces, d'apprécier une classe de franchissabilité (0 ; 0,33 ; 0,66 ou 1) en fonction de la pente du coursier et de la hauteur de chute DH à franchir.

Cependant, de la même manière que les valeurs retenues pour les tirants d'eau minimums nécessaires au franchissement, les conditions hydrauliques fixant les limites 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 situent logiquement au-delà des critères sécuritaires définis pour les seuils franchissables par conception ou les passes naturelles, qui sont dimensionnés pour maximiser le franchissement des individus d'une espèce donnée.

Présence de redan

Le cas le plus fréquemment rencontré 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 longueur d'un seuil en enrochements, peut singulièrement dégrader les conditions de franchissement piscicole (Figure 52).

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.



Figure 52



© B. Voegtli (Ecogea)

*Seuil en enrochements avec redan.
Écoulements sur la roche naturelle pouvant s'apparenter à un seuil en enrochements et présentant en tête un seuil vertical pouvant s'apparenter à un redan (Mayotte).*

N.B. Certains obstacles peuvent être considérés soit comme des seuils en enrochements équipés d'un redan important à l'amont (comme celui présenté en Figure 52), 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, il est également possible de se référer au chapitre dédié aux ouvrages complexes.

Fosse aval

Hors épisode de crue, et contrairement aux seuils plus « classiques », 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. Par ailleurs, la pente étant souvent limitée, il sera considéré que **la présence d'une fosse de profondeur notable n'est pas indispensable.**

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Les tableaux 16 et 17 (pages 104 à 107) présentent les hauteurs de chutes limites bornant les classes de franchissabilité d'un seuil en enrochements en fonction de la pente moyenne de celui-ci. Pour des questions de lisibilité, deux tableaux ont été établis (seuils de pente moyenne $\leq 9\%$ en tableau 16 et de pente moyenne $> 9\%$ en tableau 17).

Ces tableaux reprennent également les dimensions maximales admissibles (a_{\max} et c_{\max}) en cas de présence de redans.

Le tableau 15, présenté page 101, identifie les tirants d'eau minimums ($h_{\min \text{ enroch}}$) qu'il convient de vérifier en complément.

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 53 page 109) présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité.

Tableau 16

Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité des seuils en enrochements (pour des pentes moyennes de seuil $\leq 9\%$)

Groupe ICE	Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom					
				Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion		
1a	Eleotridae + Gobiidae hors Sicydiinae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X				
		<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X		
		<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X		
		<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X				
		<i>Dominator maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nèg, dormeur (C)	X	X				
		<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X					
		<i>Eleotris klunzingerii</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X		
		<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X		
		<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X				
		<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X			
		<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X		
		<i>Glossogobius kokius</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X		
		<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X				
		<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X				
1b		<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X		
		<i>Mugilogobius mertonii</i>	Gobi millet (C)			X			
		<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)			X			
		<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)			X			
		<i>Redigobius balteatus</i>	Gobie drapeau (F)			X			
		<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobi tase (C)			X			
		<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X		
		2a	Mugilidae	<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)			X	
				<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F) / millet (C)	X	X		
				<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X
2c	Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (F)			X	X		
		<i>Kuhlia sauvagii</i>				X	X		
3a	Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolore (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
3c		<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X				
4a	Gobiesocidae +	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X		
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X			
		<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	X	X				
4b	Gobiidae Sicydiinae	<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X				
		<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X				
		<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)			X	X		

Les valeurs obtenues pour les groupes ou sous-groupes 1b, 3 et 4 correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage des espèces. Dans les cas où l'obstacle présente des zones de reptation, de ventousage ou d'escalade, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à ces capacités de franchissement (voir chapitres dédiés à ces cas particuliers).



Groupe ICE	Stade et/ou taille	Dimensions maximales des redans (m)		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		Classe ICE							
		a _{max}	c _{max}	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0
1a	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	0,10	0,10	∞	-	-	-	≤ 0,4	]0,4 - 1,5]	> 1,5	-	-	≤ 0,7	]0,7 - 1,8]	> 1,8
1b	Juvénile (Lp < 40 mm)	0,02	0,02	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0
2a	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	0,10	0,15	∞	-	-	-	∞	-	-	-	≤ 1,8	> 1,8	-	-
2b	Juvénile (Lp < 100 mm)	0,02	0,05	∞	-	-	-	≤ 1,0	]1,0 - 3,0]	> 3,0	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,1]	]1,1 - 1,8]	> 1,8
2c	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	0,10	0,20	∞	-	-	-	∞	-	-	-	≤ 1,1	> 1,1	-	-
2d	Juvénile (Lp < 100 mm)	0,02	0,05	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	≤ 0,7	]0,7 - 3,0]	> 3,0	-	≤ 0,3	> 0,3	-
3a	Lp > 500 mm	0,40	0,70	∞	-	-	-	≤ 1,0	]1,0 - 3,0]	> 3,0	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,1]	]1,1 - 1,8]	> 1,8
3b	100 mm < Lp < 500 mm	0,10	0,20	∞	-	-	-	≤ 0,4	]0,4 - 1,5]	> 1,5	-	-	≤ 0,7	]0,7 - 1,8]	> 1,8
3c	Lp < 100 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4a	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	0,05	0,10	∞	-	-	-	≤ 1,0	> 1,0	-	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,9]	> 1,9	-
4b	Juvénile (Lp < 40 mm)	0,02	0,02	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0

Tableau 17

Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité des seuils en enrochements (pour des pentes moyennes de seuil > 9 %)

Groupe ICE	Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom					
				Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion		
1a	Eleotridae + Gobiidae hors Sicydiinae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X				
		<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X		
		<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X		
		<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X				
		<i>Dorminator maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nèg, dormeur (C)	X	X				
		<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X					
		<i>Eleotris klunzingerii</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X		
		<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X		
		<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X				
		<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X			
		<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X		
		<i>Glossogobius kokius</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X		
		<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X				
		<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X				
1b		<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X		
		<i>Mugilogobius mertoni</i>	Gobi millet (C)			X			
		<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)			X			
		<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)			X			
		<i>Redigobius balteatus</i>	Gobie drapeau (F)			X			
		<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobi tase (C)			X			
		<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X		
		2a	Mugilidae	<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)			X	
				<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F) / millet (C)	X	X		
				<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X
2c	Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (F)			X	X		
		<i>Kuhlia sauvagii</i>				X	X		
3a	Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolor (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
3c		<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X				
4a	Gobiesocidae + Gobiidae	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X		
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X			
		<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	X	X				
4b	Sicydiinae	<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X				
		<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X				
		<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)			X	X		

Les valeurs obtenues pour les groupes ou sous-groupes 1b, 3 et 4 correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage des espèces. Dans les cas où l'obstacle présente des zones de reptation, de ventousage ou d'escalade, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à ces capacités de franchissement (voir chapitres dédiés à ces cas particuliers).



Groupe ICE	Stade et/ou taille	Dimensions maximales des redans (m)		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
		a _{max}	c _{max}	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	0
1a	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	0,10	0,10	-	≤ 0,3	]0,3 - 1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
1b	Juvenile (Lp < 40 mm)	0,02	0,02	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	> 0,0
2a	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	0,10	0,15	≤ 1,0	]1,0 - 4,0]	> 4,0	-	≤ 0,5	]0,5 - 2,4]	> 2,4	-	-	≤ 0,9	]0,9 - 3,4]	> 3,4	> 0,0
2b	Juvenile (Lp < 100 mm)	0,02	0,05	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
2c	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	0,10	0,20	≤ 0,5	]0,5 - 3,2]	> 3,2	-	-	≤ 2,2	> 2,2	-	-	≤ 0,6	]0,6 - 3,3]	> 3,3	> 0,0
2d	Juvenile (Lp < 100 mm)	0,02	0,05	-	-	≤ 0,5	> 0,5	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	> 0,0
3a	Lp > 500 mm	0,40	0,70	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
3b	100 mm < Lp < 500 mm	0,10	0,20	-	≤ 0,3	]0,3 - 1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
3c	Lp < 100 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4a	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	0,05	0,10	-	≤ 1,4	]1,4 - 4,0]	> 4,0	-	≤ 0,6	]0,6 - 2,4]	> 2,4	-	-	≤ 0,9	> 0,9	> 0,0
4b	Juvenile (Lp < 40 mm)	0,02	0,02	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	> 0,0

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité d'un obstacle en enrochements sont décrites ci-après.

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

Si une voie de passage continue existe avec un tirant d'eau $h \geq h_{\text{min enroch}}$ (Tableau 15 page 101), alors le tirant d'eau est suffisant. Aller en 2.

Si aucune voie de passage continue de ce type n'existe (obligation pour le poisson de rencontrer des portions de rampe où $h < h_{\text{min enroch}}$), l'obstacle peut être considéré, dans ces conditions hydrologiques, comme une barrière totale au sens d'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 sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site dans d'autres conditions hydrologiques.*

2. Analyse des redans

Si l'obstacle ne présente pas de redans ou si les redans sont considérés comme négligeables ($h \geq 2a$), aller directement en 3.

Si une des dimensions (a ou c) d'un seul des redans présents dépasse la valeur maximale a_{max} ou c_{max} (Tableaux 16 et 17 pages 104 à 107), l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

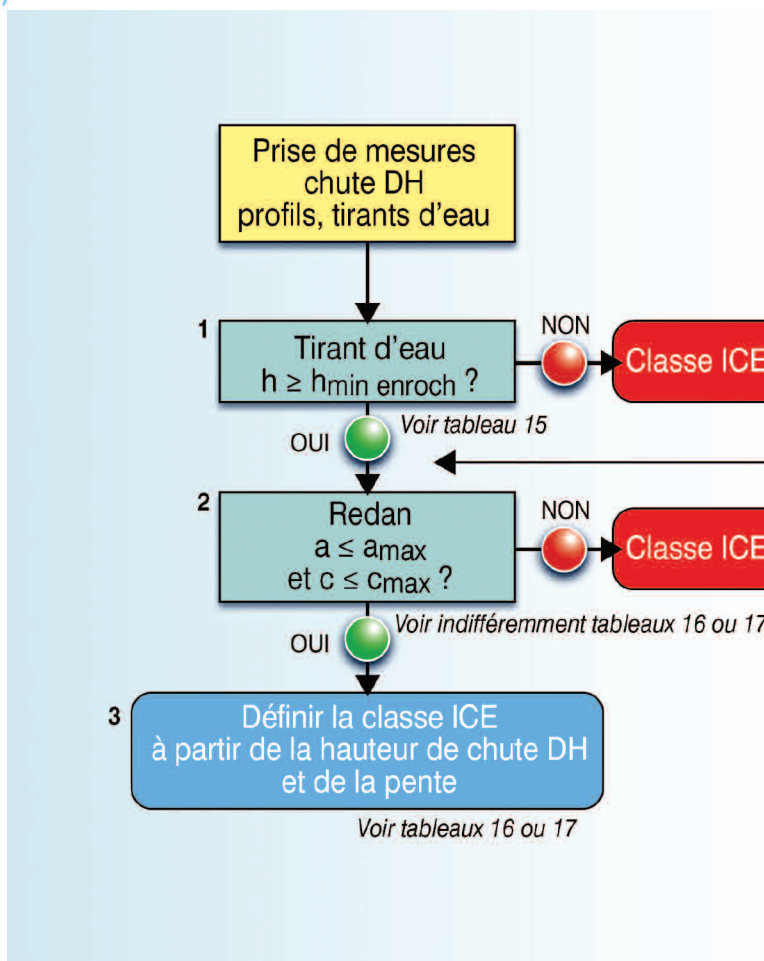
Si les dimensions (a et c) de chaque redan sont inférieures aux valeurs seuils (a_{max} et c_{max} , tableaux 16 et 17), aller en 3.

3. Analyse de la chute et de la pente du seuil

À partir de la hauteur de chute DH et de la pente du seuil, puis des tableaux 16 et 17, définir la classe de franchissabilité ICE de l'ouvrage.



Figure 53



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



Cas des éléments mobiles associés à un ouvrage

Écoulements par surverse

La problématique de la franchissabilité des vannes ou des clapets déversants (Figure 54) n'est pas significativement différente de celle du franchissement des obstacles verticaux ou quasi-verticaux. **Aussi, c'est de la même manière que doit être abordée la franchissabilité de structures mobiles présentant des écoulements surversants** (voir chapitre dédié aux obstacles verticaux ou quasi-verticaux de pente > 150 %).

Afin de bien apprécier la franchissabilité de ces ouvrages, il est nécessaire de connaître les modalités de gestion des dispositifs (fréquence, périodes d'ouverture, ...).

Figure 54



a, b © B. Voegtli (Ecogea)

Écoulements au-dessus d'organes mobiles.

(a) Clapet mobile de la rivière Kwalé (Mayotte), (b) Clapet prise AEP SMAE (Mayotte).

Écoulements par sousverse

Critères de franchissabilité

Bien que ce type d'écoulement (passage du débit sous un dispositif levé) soit peu fréquent dans les Drom insulaires, il est toutefois intéressant de disposer d'éléments permettant d'apprécier la franchissabilité de ces organes par les différents groupes d'espèces.

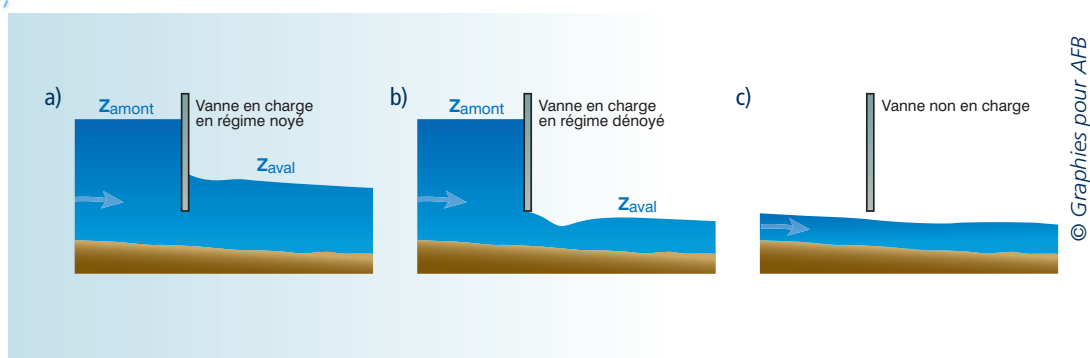


■ Les différents types d'écoulements sous des organes mobiles

Lorsque la vanne est en charge, l'ouverture est complètement submergée et l'écoulement est comparable à un écoulement à travers un orifice (Figure 55a, b). L'écoulement est contracté et il peut y avoir une forte mise en vitesse de celui-ci.

Lorsque la vanne n'est pas en charge (Figure 55c), 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 mise en vitesse de l'écoulement, comme dans le cas d'une vanne en charge. L'écoulement est alors à surface libre et l'analyse de la franchissabilité est identique à celle pratiquée pour un seuil à parement incliné.

Figure 55



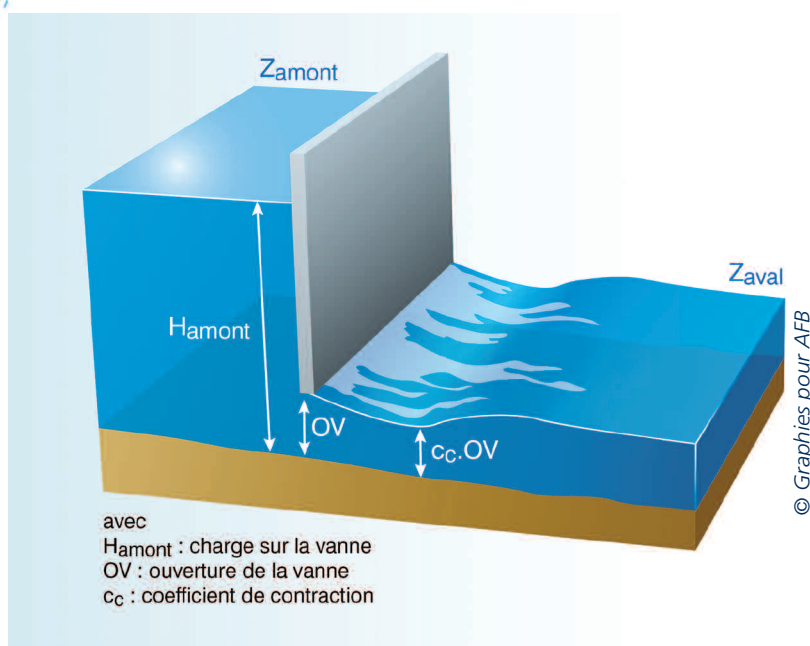
Schémas de vannes en charge et non en charge. D'après Baudoin et al., 2014.

■ Écoulements en charge noyés ou dénoyés

Écoulement dénoyé

Dans le cas d'un écoulement en régime dénoyé (Figure 56), 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 passe sous la vanne dans une section S_c , et est accéléré jusqu'à une section contractée S_c , où la vitesse d'écoulement est maximale (V_{max}) et voisine de : $V_{\text{max}} = \sqrt{(2 \cdot g \cdot H_{\text{amont}})}$

Figure 56



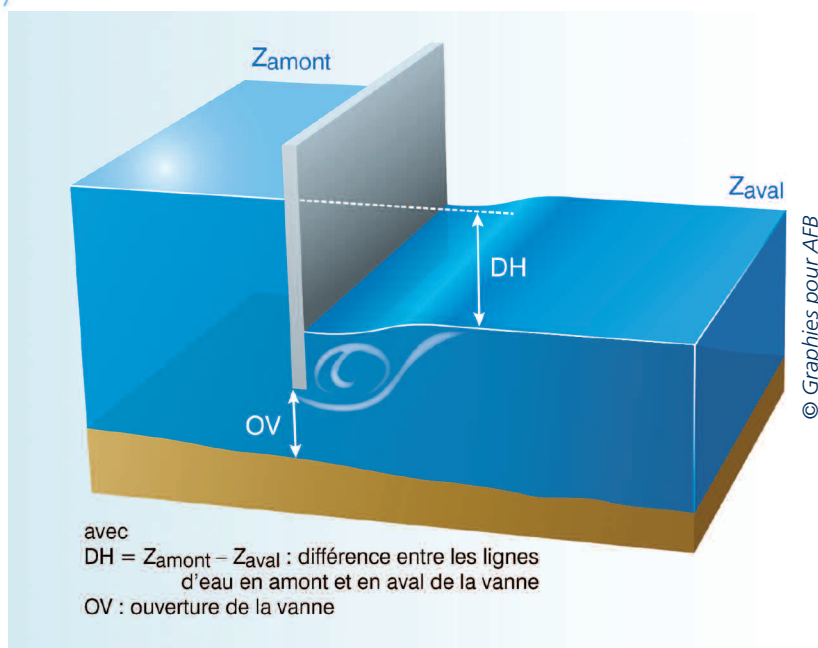
Paramètres permettant de caractériser un écoulement sous vanne en régime dénoyé. D'après Baudoin et al., 2014.

Dans le cadre de la méthode ICE, cette vitesse maximale sera confrontée 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 57), 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 la différence des niveaux d'eau de part et d'autre de la vanne est à prendre en compte pour apprécier les conditions d'écoulement au niveau de l'ouvrage.

Figure 57



Paramètres permettant de caractériser un écoulement sous vanne en régime noyé.
 D'après Baudoin et al., 2014.

La vitesse moyenne de l'écoulement au niveau de la section de passage est voisine de $\sqrt{(2.g.DH)}$

■ Définitions des classes de franchissabilité

En confrontant les vitesses d'écoulement V_{max} aux 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 ICE pour des passages sous vanne 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 vitesses d'écoulement sous une vanne, d'autres paramètres comme l'épaisseur de la vanne, sa forme ou la rugosité du coursier peuvent également avoir une influence sur les conditions hydrauliques locales.

À la condition que le tirant d'eau au niveau de la section contractée et l'ouverture sous la vanne soient suffisants pour permettre le passage des poissons, la franchissabilité est déterminée de la façon suivante :

- si le dénivelé DH (ou H_{amont} dans le cas d'une vanne dénoyée) induit des vitesses d'écoulement V inférieures à la vitesse de sprint U_{max} associée à la taille minimale L_{min} des poissons du sous-groupe considéré, 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) induit des vitesses d'écoulement V comprises entre les vitesses de sprint U_{max} associées aux tailles minimale $L_{p_{\text{min}}}$ et moyenne $L_{p_{\text{moy}}}$ des poissons du sous-groupe considéré, 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) induit des vitesses d'écoulement V comprises entre les vitesses de sprint U_{max} associées aux tailles moyenne $L_{p_{\text{moy}}}$ et maximale $L_{p_{\text{max}}}$ des poissons du sous-groupe considéré, 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) induit des vitesses d'écoulement V supérieures à la vitesse de sprint U_{max} associée à la taille maximale $L_{p_{\text{max}}}$ des poissons du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière totale (Classe ICE = 0)**.

Section d'ouverture

La lame d'eau (notamment au niveau de la section d'écoulement contractée) 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.

Cependant, il est souvent difficile de 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 une **hauteur minimale d'ouverture de la vanne (OV_{min}) correspondant à environ 2 fois les valeurs de tirant d'eau (h_{min}) retenues pour les différentes espèces**. Le tirant d'eau dans la section contractée, plus faible, restera alors dans la limite des valeurs de h_{min} déterminées précédemment.

À titre d'exemple pour les Kuhlidae, *l'ouverture minimale nécessaire (OV_{min}) est de l'ordre de 20 cm pour les adultes / subadultes (sous-groupe 2c) et de l'ordre de 10 cm pour les juvéniles (sous-groupe 2d)*.

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associés à l'arbre décisionnel

Le tableau 18 pages 114 et 115 récapitule, en fonction des espèces cibles, les différentes valeurs seuils permettant de déterminer la franchissabilité d'un passage sous vanne ou par un orifice.

Ce tableau est accompagné d'un arbre décisionnel (Figure 58 page 116) présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité.

Tableau 18

Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité d'écoulements sous organes mobiles ou par des orifices de fond

Groupe ICE	Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom					
				Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion		
1a	Eleotridae + Gobiidae hors Sicydiinae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X				
		<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X		
		<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X		
		<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X				
		<i>Dorminator maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nèg, dormeur (C)	X	X				
		<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X					
		<i>Eleotris klunzingerii</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X		
		<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X		
		<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X				
		<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X			
		<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X		
		<i>Glossogobius kokius</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X		
		<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X				
		<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X				
1b		<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X		
		<i>Mugilogobius mertoni</i>	Gobi millet (C)			X			
		<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)			X			
		<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)			X			
		<i>Redigobius balteatus</i>	Gobie drapeau (F)			X			
		<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobi tase (C)			X			
		<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X		
		2a	Mugilidae	<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)			X	
				<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F) / millet (C)	X	X		
				<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X
2c	Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (F)			X	X		
		<i>Kuhlia sauvagii</i>				X	X		
3a	Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolor (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
3c		<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X				
4a	Gobiesocidae + Gobiidae	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X		
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X			
		<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	X	X				
		<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X				
		<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X				
4b	Sicydiinae	<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)			X	X		

Les valeurs obtenues pour les groupes ou sous-groupes 1b, 3 et 4 correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage des espèces. Dans les cas où l'obstacle présente des zones de reptation, de ventousage ou d'escalade, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à ces capacités de franchissement (voir chapitres dédiés à ces cas particuliers).



Groupe ICE	Stade et/ou taille	Tirant d'eau minimum nécessaire pour la nage (h_{\min})	Ouverture sous vanne minimale (OV_{\min})	Valeurs seuils de dénivellé pour les passages sous organes mobiles en charge noyés par l'aval (ou de charge amont H_{amont} pour les vannes en charge dénoyées en aval) (m)			
				Classe ICE			
				1	0,66	0,33	0
1a	Subadulte / Adulte ($L_p > 40$ mm)	0,05 m	0,10 m	$\leq 0,10$	]0,10 - 0,25]	]0,25 - 0,45]	$> 0,45$
1b	Juvenile ($L_p < 40$ mm)	0,01 m	0,02 m	-	$\leq 0,05$	]0,05 - 0,10]	$> 0,10$
2a	Subadulte / Adulte ($L_p > 100$ mm)	0,05 m	0,10 m	$\leq 0,45$	]0,45 - 1,00]	]1,00 - 1,80]	$> 1,80$
2b	Juvenile ($L_p < 100$ mm)	0,05 m	0,10 m	$\leq 0,20$	]0,20 - 0,40]	]0,40 - 0,60]	$> 0,60$
2c	Subadulte / Adulte ($L_p > 100$ mm)	0,10 m	0,20 m	$\leq 0,30$	]0,30 - 0,80]	]0,80 - 1,60]	$> 1,60$
2d	Juvenile ($L_p < 100$ mm)	0,05 m	0,10 m	$\leq 0,05$	]0,05 - 0,25]	]0,25 - 0,45]	$> 0,45$
3a	$L_p > 500$ mm	0,05 m	0,10 m	$\leq 0,40$	]0,40 - 0,60]	]0,60 - 0,80]	$> 0,80$
3b	$100 \text{ mm} < L_p < 500$ mm	0,02 m	0,04 m	$\leq 0,10$	]0,10 - 0,25]	]0,25 - 0,45]	$> 0,45$
3c	$L_p < 100$ mm	-	-	-	-	-	-
4a	Subadulte / Adulte ($L_p > 40$ mm)	0,05 m	0,10 m	$\leq 0,20$	]0,20 - 0,50]	]0,50 - 1,40]	$> 1,40$
4b	Juvenile ($L_p < 40$ mm)	0,01 m	0,02 m	-	$\leq 0,05$	]0,05 - 0,10]	$> 0,10$

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité d'un passage sous vanne ou par un orifice sont décrites ci-après.

1. Analyse de l'ouverture de vanne

Si l'ouverture de la vanne ou la hauteur de l'orifice de fond $OV \geq OV_{\min}$ (Tableau 18 pages 114 et 115), alors les hauteurs de passage sous vanne et au niveau de la section contractée sont suffisantes. Aller en 2.

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).

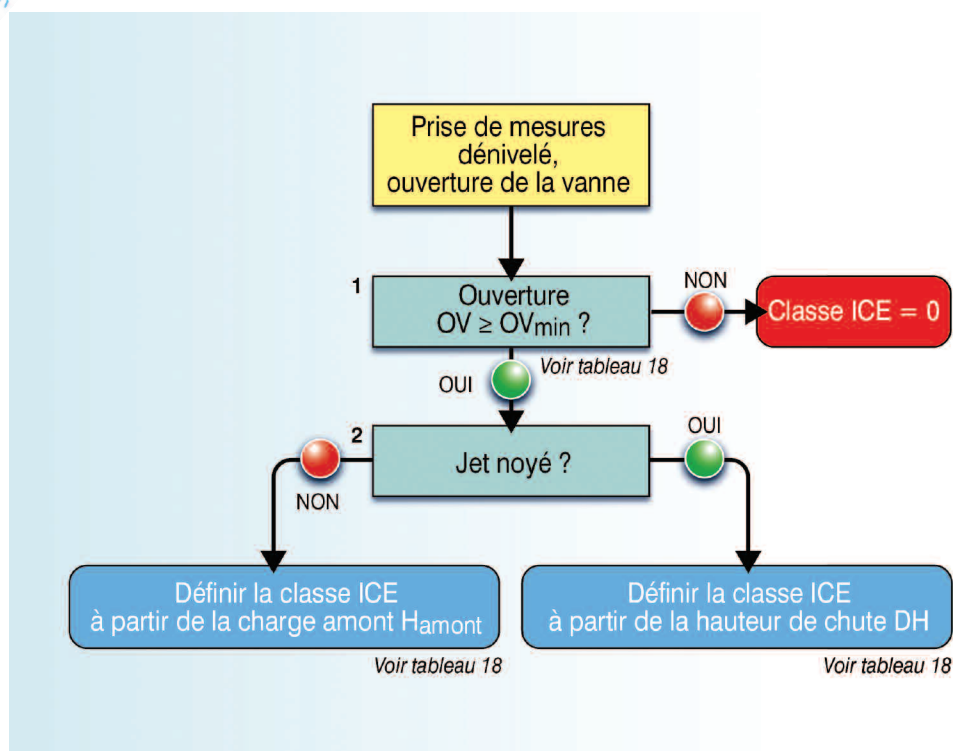
2. Analyse du dénivelé DH (jets noyés) ou de la charge amont H_{amont} (jets dénoyés)

Si l'écoulement est à jet noyé, définir la classe de franchissabilité ICE qui est fonction de la hauteur de chute DH (Tableau 18).

Si l'écoulement est à jet dénoyé, définir la classe de franchissabilité ICE qui est fonction de la charge amont H_{amont} (Tableau 18).

N.B. En écoulement libre (vanne non en charge), la configuration de l'ouvrage s'apparente à un seuil sur lequel s'articule l'élément mobile. Pour ce mode de fonctionnement, l'évaluation de la franchissabilité reposera donc sur l'évaluation de la franchissabilité du seuil (voir chapitres dédiés aux seuils).

Figure 58



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





Cas des ouvrages routiers ou ferroviaires

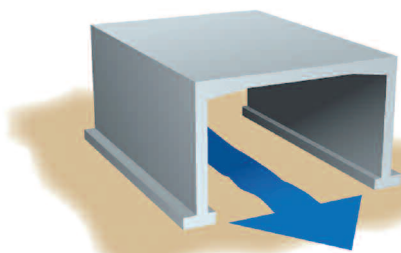
Les différents types d'ouvrages

Cette section aborde l'évaluation de la franchissabilité des ouvrages routiers, autoroutiers et ferroviaires (Figure 59), dont les configurations peuvent être variées : ponts cadres de type PIPO (passage inférieur en portique ouvert) ou PICF (passage inférieur en cadre fermé), passages busés ou arches et ouvrages s'en approchant (gués, radiers de pont ...).

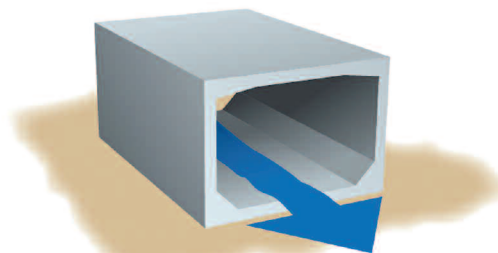
En se substituant localement au milieu naturel, ces ouvrages modifient généralement le substrat (cas notamment des PICF), les conditions d'éclairement et les conditions hydrauliques locales.

Figure 59

Passage inférieur en portique ouvert (PIPO)



Passage inférieur en cadre fermé (PICF)



Exemples de différents types d'ouvrages.

© Graphies pour AFB

a © P. Valade (Ocea Consult)
b © B. Voegtli (Ecogea)

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-après.

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

Lorsque la pente de l'ouvrage (buse, ponceau...) est supérieure à la pente du cours d'eau à l'amont, l'écoulement subit une accélération brutale en tête d'ouvrage. Compte tenu de la faible rugosité du substrat, les vitesses atteignent rapidement des valeurs importantes, l'écoulement pouvant même devenir torrentiel (Figure 60).

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 en termes d'endurance.

Figure 60



a © B. Voegtlé (Ecogea)
b © F. Mayeras (Ecogea)

Exemples de fortes vitesses au niveau de passages busés.
(a) Buse sur la rivière Saint-Étienne (Réunion), (b) Gué sur la Maronne.

■ 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 des poissons difficiles voire impossibles.

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 être très faible, même hors période d'étiage (Figure 61).

Figure 61



© B. Voegtlé (Ecogea)

Exemple de faibles tirants d'eau au niveau d'un radier sous un pont routier.
Passage Beija (Mayotte).



■ 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 62). Cela est très fréquent et 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 du fil d'eau en aval, consécutif à l'installation de l'ouvrage si aucune mesure préventive (seuil de contrôle) n'a été prise pour stabiliser le lit.

Dans le cas d'une buse, du fait de la mise en vitesse des écoulements dans l'ouvrage, l'angle d'incidence du jet en sortie peut accentuer ce problème de franchissement de la chute aval.

Plus rarement, il peut exister un redan à l'intérieur de l'ouvrage, résultant souvent d'un mauvais calage entre différents éléments constitutifs. Les faibles tirants d'eau généralement observés rendent le franchissement particulièrement difficile à ce niveau, même si le redan présente une hauteur limitée.

Figure 62



a, b, c, d © B. Voegtli (Ecogea)

Exemples de chutes en aval d'ouvrages routiers.

(a) Pont de la Ravine chaude sur la Grande Rivière à Goyaves (Guadeloupe), (b) Rivière Blanche (Martinique), (c) Radier Beauvallon sur la rivière des Roches (Réunion), (d) Pont Baimbridge sur la Grande Rivière à Goyaves (Guadeloupe).

■ 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 les poissons (Figures 63 et 64).

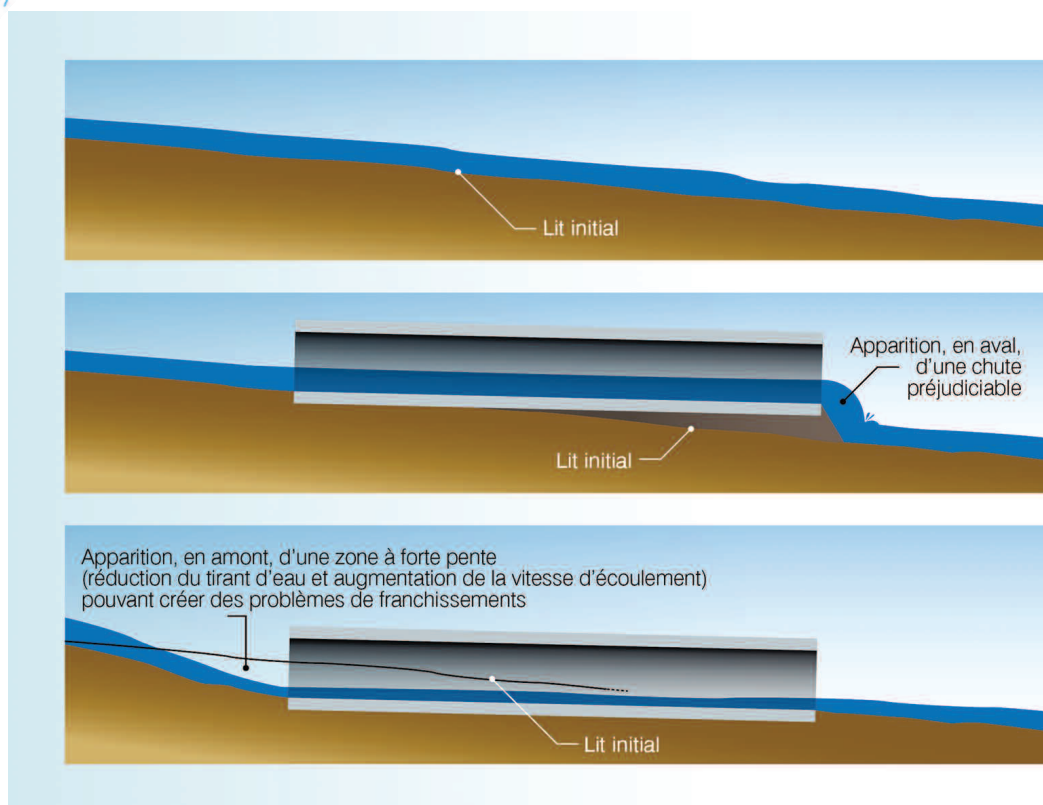
Figure 63



© B. Voegtli (Ecogea)

Exemple de mise en vitesses en amont d'un passage busé.
Buses sur la rivière Saint-Étienne (Réunion)

Figure 64



© Graphies pour AFB

Exemples de problèmes pouvant survenir suite à un mauvais calage longitudinal d'un ouvrage de franchissement routier ou ferroviaire. D'après Baudoin et al., 2014.

■ **L'accumulation de débris à l'entrée ou dans les** représente aussi une fréquente cause de blocage pour les migrateurs (Figure 65). 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 d'écoulement) et lorsque le tirant d'air entre la ligne d'eau et la tête de l'ouvrage hydraulique est insuffisant.

Figure 65



a, b © B. Voegtli (Ecogea)

Exemples d'ouvrages fortement comblés en amont par des embâcles. (a) et (b) Ouvrages colmatés sur des rivières martiniquaises.

■ Le changement brusque d'intensité lumineuse

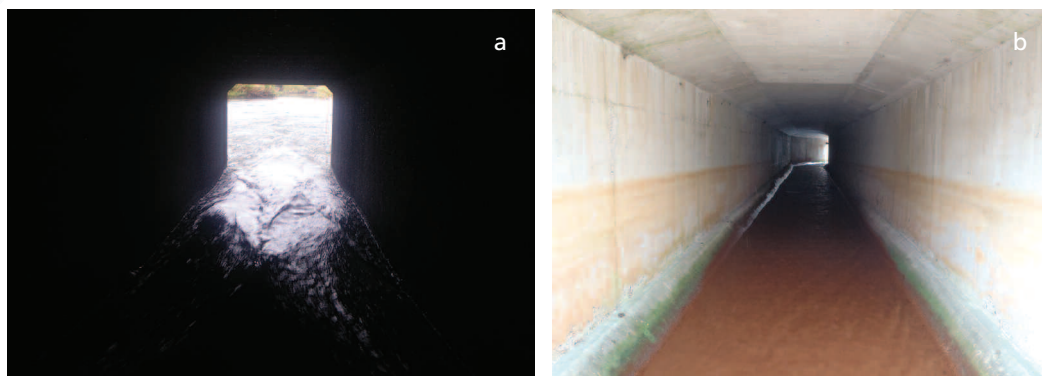
Lorsqu'il existe un changement brusque d'intensité lumineuse entre le milieu extérieur et l'entrée de la buse (Figure 66), certaines espèces (plus particulièrement celles se déplaçant en journée) peuvent éprouver des réticences à s'engager ou à progresser dans l'ouvrage.



Les connaissances étant parcellaires à ce sujet, ce type de perturbation n'est toutefois pas pris en compte dans la méthode ICE.

Pour plus de détails, il sera possible de se référer notamment aux rapports établis par le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables (Egis Environnement - Hydrosphère, 2007 et 2008).

Figure 66



a © B. Voegtli (Ecogea)
b © M. Chanseau (AFB)

Exemples d'ouvrages induisant un changement de luminosité plus ou moins progressif voire brusque.
(a) Changement de luminosité assez brusque pouvant impacter le franchissement diurne de l'ouvrage, (b) Ouvrage de section plus importante, entraînant un changement de luminosité plus progressif.

Principe de l'évaluation

Comme pour les autres types d'obstacles, l'évaluation de la franchissabilité de l'ouvrage consiste à relever les différents facteurs susceptibles de limiter le déplacement 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 au sein de ou en pied d'ouvrage.

Évaluation 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 incliné. Cette 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 %), les poissons, en particulier les petites espèces, devront faire appel à leur vitesse de sprint (U_{\max}) et les facteurs limitants seront les vitesses dans l'ouvrage et la longueur de celui-ci.

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 (mais moins rapidement que dans le cas des ouvrages à pente plus forte).

■ Activité de nage utilisée 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 celle correspondant à la vitesse limite (supérieure) de croisière U_{cr} avant le passage en anaérobie :

$$P_{aer} = k U_{cr}^3$$

D'après Bell (1986), l'énergie (puissance x temps) musculaire anaérobie (W_{ana}) dépensée 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 développée est la suivante :

$$P = k U^3$$

La puissance anaérobie développée peut donc s'écrire :

$$P_{ana} = P - P_{aer} = k (U^3 - U_{cr}^3).$$

L'énergie musculaire anaérobie maximale dépensée lors de la nage à vitesse U peut donc s'écrire :

$$W_{ana} = t_U k (U^3 - U_{cr}^3).$$

On a donc

$$W_{ana} = t_U k (U^3 - U_{cr}^3) = k \cdot U_{max}^3 \cdot t_{Umax}$$

Soit

$$t_U = U_{max}^3 \cdot t_{Umax} / (U^3 - U_{cr}^3)$$

La distance D maximale parcourue par le poisson nageant à la vitesse U dans un écoulement de vitesse V est donc :

$$D = (t_{Umax} U_{max}^3)(U - V) / (U^3 - U_{cr}^3)$$

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 poisson nageant à une vitesse U peut s'écrire également :

$$D = 27 t_{Umax} U_{cr} (U / U_{cr} - V / U_{cr}) / ((U / U_{cr})^3 - 1)$$

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 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 très proche de U_{max} puisque $U > 0,95 U_{max}$

Le poisson a donc intérêt à nager à la vitesse U_{cr} , tant que la vitesse d'écoulement demeure inférieure à cette limite supérieure de la vitesse de croisière.

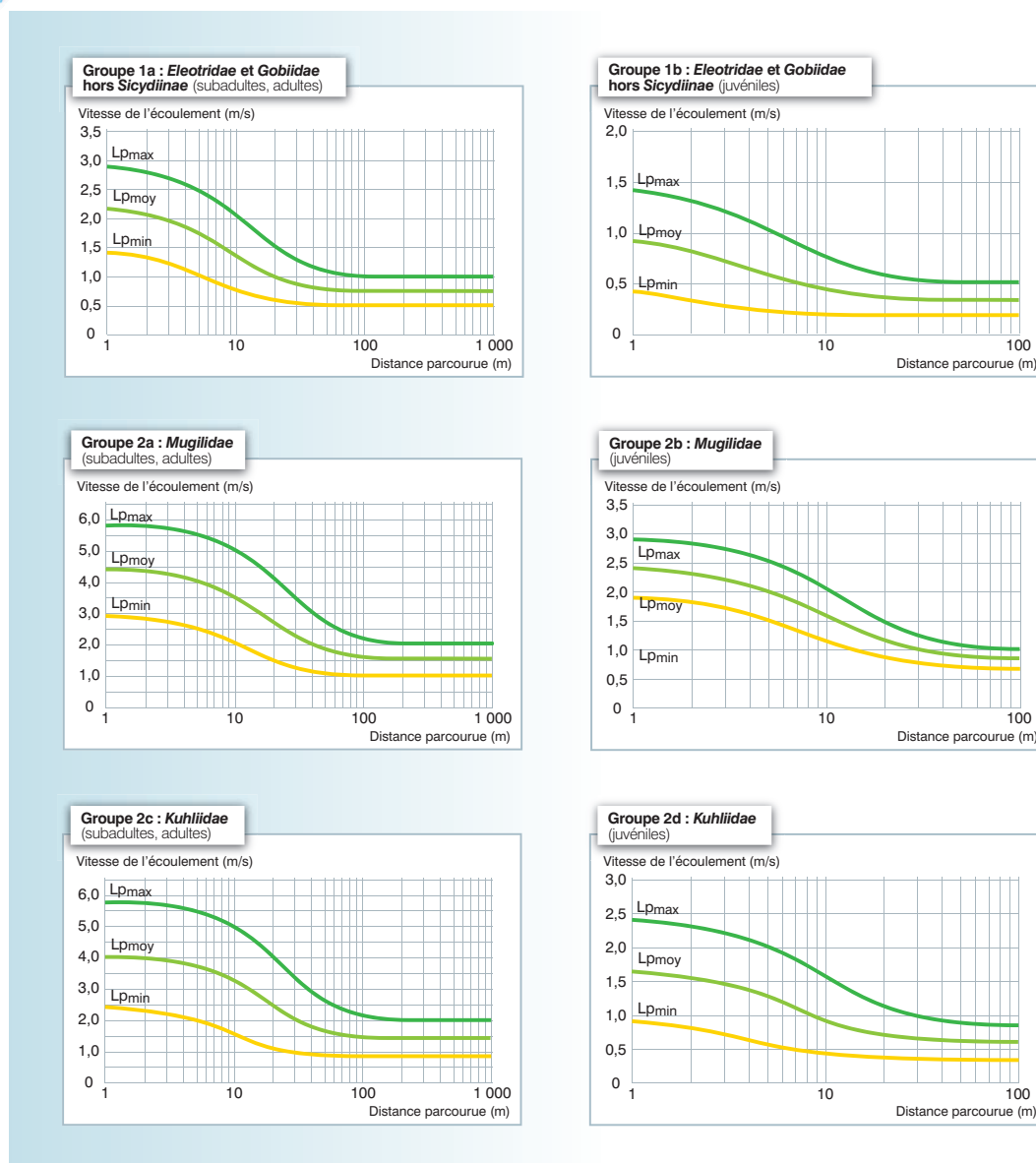
Lorsque la vitesse de l'écoulement devient supérieure aux $2/3$ de la vitesse maximale de nage, la distance franchie est maximale lorsque le poisson adopte sa vitesse maximale de nage.

■ Évaluation de la distance maximale franchissable par un poisson dans un écoulement de vitesse donnée

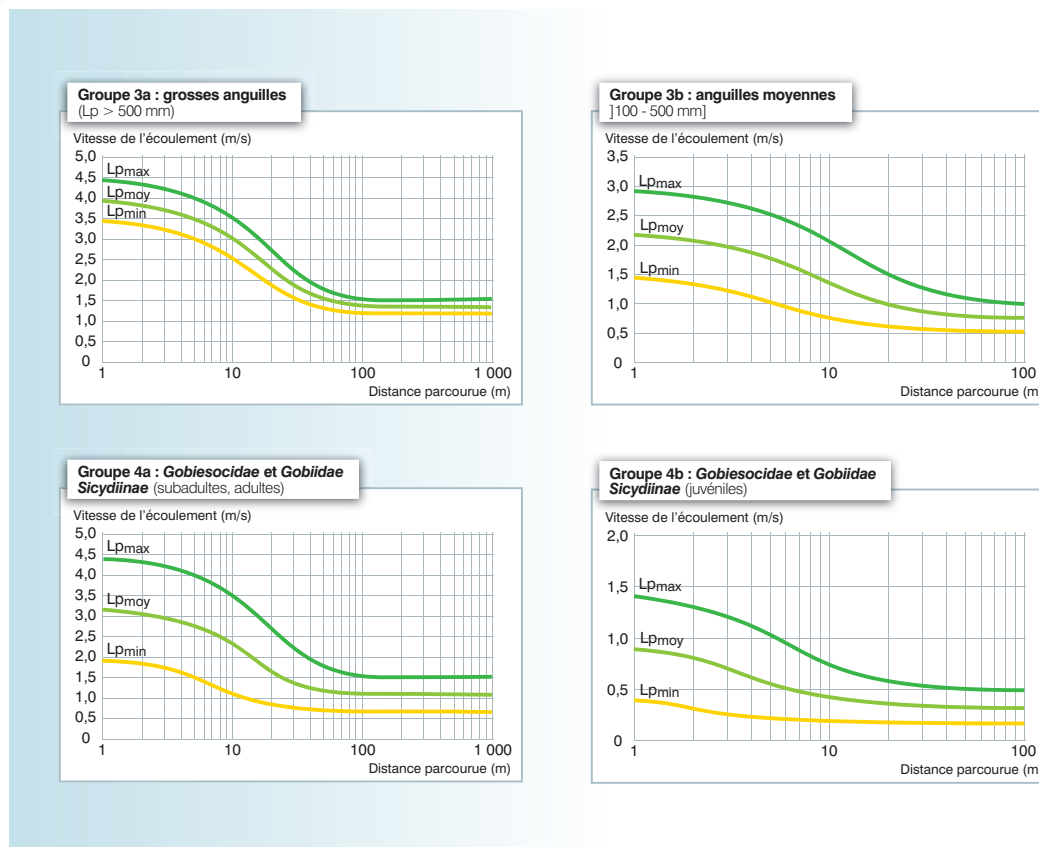
Pour les différents groupes d'espèces, en faisant l'hypothèse que le poisson optimise sa vitesse de nage en fonction de la vitesse de l'écoulement (voir ci-dessus), l'évolution des distances parcourues en fonction de la vitesse de l'écoulement a été exprimée en coordonnées semi-logarithmiques (Figures 67 et 68).

Pour chaque groupe ou sous-groupe d'espèces, les courbes vert foncé, vert clair et jaune correspondent respectivement aux individus de tailles maximale (L_{pmax}), moyenne ($L_{p moy}$) et minimale ($L_{p min}$).

Figure 67



Évolution de la distance parcourue en fonction de la vitesse de l'écoulement pour les groupes d'espèces n°1 et 2.



Évolution de la distance parcourue en fonction de la vitesse de l'écoulement pour les groupes d'espèces n°3 et 4.

Définition des classes de franchissabilité

Pour des seuils à parement aval incliné (voir chapitre dédié aux seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150\%$), il est possible, pour chaque espèce ou groupe d'espèces, 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 ou du groupe d'espèces), 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 aux débits d'intérêt, 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 présentées (Figures 67 et 68) constituent les limites entre les classes de franchissabilité (0 ; 0,33 ; 0,66 et 1). Pour déterminer, pour un groupe d'espèces, les pentes limites franchissables pour une longueur d'ouvrage donnée, nous avons extrait, des abaques présentés précédemment, les vitesses d'écoulement limites (V_{max}) permettant le franchissement de l'ouvrage.



Les pentes donnant la valeur de cette vitesse d'écoulement pour des rugosités courantes d'ouvrages (coefficients de 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.

Puis, une analyse statistique sur les pentes a été effectuée, en vérifiant que le tirant d'eau est supérieur à la valeur 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 69), pouvant limiter (voire bloquer) 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 ou quasi-verticaux. Dans un premier temps, la classe de franchissabilité de la chute sera donc établie à partir de l'arbre décisionnel et du tableau associé, proposés dans le chapitre dédié aux obstacles verticaux ou quasi-verticaux (pente $> 150 \%$).

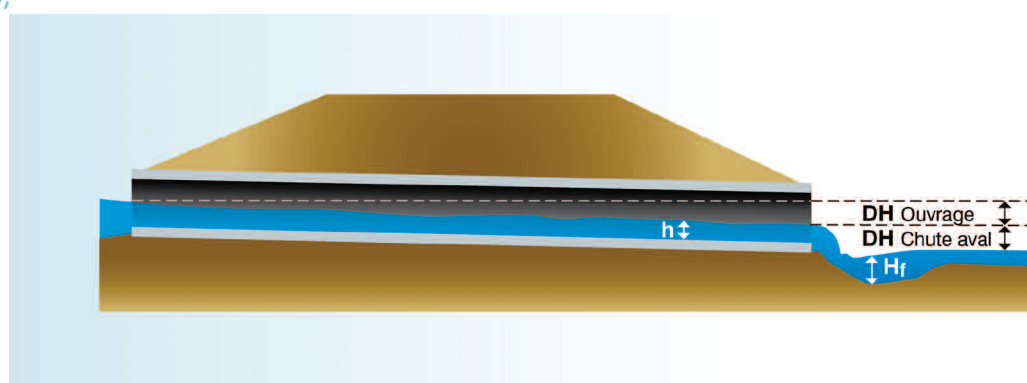
De manière à prendre en compte l'impact de la chute aval dans le diagnostic de franchissabilité de l'ouvrage, nous proposons d'adopter la même méthodologie que pour les ouvrages complexes ou mixtes (voir chapitre dédié à ce type d'ouvrages) ou les seuils inclinés présentant une chute aval (voir chapitre dédié aux seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150 \%$), à savoir de dégrader globalement la classe de franchissabilité ICE retenue pour l'ensemble de l'ouvrage ou tout au moins de retenir celle de la partie la plus problématique (chute aval ou buse).

La franchissabilité globale de l'ouvrage est alors déterminée en fonction des classes de chacune des deux parties (passage routier et chute aval) selon les règles définies dans le tableau 19 page 126.

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 successifs (buses ou dalots) constituant l'ouvrage.

Figure 69



© Graphies pour AFB

Schéma de principe d'un ouvrage routier présentant une chute aval. D'après Baudoin et al., 2014.

Tableau 19

Détermination de la classe de franchissabilité ICE globale d'un ouvrage de franchissement routier présentant une chute aval. D'après Baudoin et al., 2014

		Classe ICE de la chute aval			
		0	0,33	0,66	1
Classe ICE de l'ouvrage busé	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

Le poisson ne peut franchir un redan que par la nage, c'est à dire lorsque le redan est effacé et que l'écoulement est « de surface » (*skimming flow*).

Pour estimer la franchissabilité dans ce cas, on adoptera les mêmes critères que pour les seuils classiques, critères portant notamment sur les dimensions relatives du redan par rapport à la taille moyenne ($L_{p_{moy}}$) du groupe d'espèces cible (voir chapitre dédié aux redans dans le cas de seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150\%$).

Cas d'ouvrages en charge et/ou noyés par l'aval

Selon la dimension des ouvrages et en fonction du 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 à l'intérieur.

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 chapitre dédié aux 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.

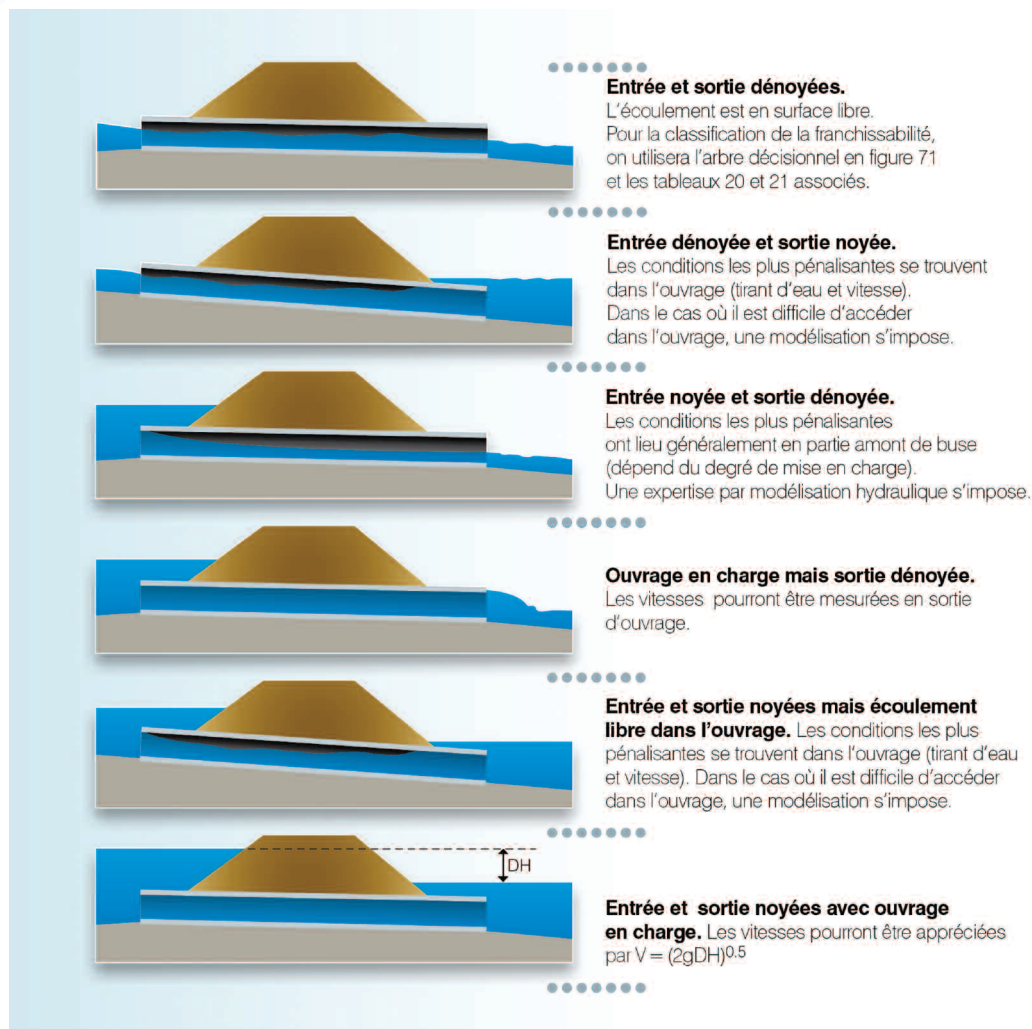
S'il s'avère impossible d'entrer dans l'ouvrage pour effectuer des mesures de vitesses, seule une modélisation hydraulique permettra d'apprécier les conditions hydrauliques rencontrées par le poisson sur tout le linéaire à franchir.

Toutefois, dans le cas où une modélisation hydraulique s'impose théoriquement, il est souvent judicieux d'effectuer l'analyse tout de même à partir de l'arbre décisionnel et des tableaux associés proposés ci-après (Tableaux 20 et 21 pages 128 à 131). En effet, la classe de franchissabilité obtenue ainsi, qui sera considérée comme une classe « maximale » (Classe ICE réelle de l'ouvrage \leq Classe obtenue), permettra de déterminer l'utilité d'avoir recours à une modélisation hydraulique.



La figure 70 représente diverses configurations possibles d'écoulements au travers de passages busés et les méthodes permettant d'en déterminer la franchissabilité.

Figure 70



© Graphies pour AFB

Diverses configurations d'écoulement dans les buses et méthodologies employées pour estimer leur franchissabilité par la nage.

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Le tableau 20 (pages 128 et 129) présente les classes de franchissabilité d'un ouvrage en fonction de sa longueur et de sa pente.

Dans certains cas, lorsque la pente est trop faible, il convient d'apprécier également les vitesses d'écoulement rapportées à la longueur de l'ouvrage (Tableau 21 pages 130 et 131) pour déterminer sa franchissabilité.

Ces 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.

Ils sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 71 page 133) présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité.

Groupe ICE	Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom					
				Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion		
1a	Eleotridae + Gobiidae hors Sicydiinae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X				
		<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X		
		<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X		
		<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X				
		<i>Dorminator maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nèg, dormeur (C)	X	X				
		<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X					
		<i>Eleotris klunzingerii</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X		
		<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X		
		<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X				
		<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X			
		<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X		
		<i>Glossogobius kokius</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X		
		<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X				
		<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)			X			
1b		<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X		
		<i>Mugilogobius mertoni</i>	Gobi millet (C)			X			
		<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)			X			
		<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)			X			
		<i>Redigobius balteatus</i>	Gobie drapeau (F)			X			
		<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobi tase (C)			X			
		<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X		
		2a	Mugilidae	<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)			X	
				<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F) / millet (C)	X	X		
				<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X
2c	Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (F)			X	X		
		<i>Kuhlia sauvagii</i>				X	X		
3a	Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
3b		<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolore (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
3c		<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X		
		<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X				
4a	Gobiesocidae +	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X		
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X			
4b	Gobiidae Sicydiinae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	X	X				
		<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X				
		<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X				
		<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)			X	X		

Les valeurs obtenues pour les groupes ou sous-groupes 1b, 3 et 4 correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage des espèces. Dans les cas où l'obstacle présente des zones de reptation, de ventousage ou d'escalade, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à ces capacités de franchissement (voir chapitres dédiés à ces cas particuliers).



Groupe ICE	Stade et/ou taille	Tirant d'eau minimum nécessaire pour la nage (h_{\min})	Dimensions maximales des redans (m)		Valeurs seuils de pente d'ouvrage pour le diagnostic (%)						
					Louvrage ≤ 20 m				Louvrage > 20 m		
			Classe ICE				Classe ICE				
			a_{\max}	c_{\max}	NC	0,66	0,33	0	NC	0,33	0
1a	Subadulte / Adulte ($L_p > 40$ mm)	0,05 m	0,10	0,10	$\leq 0,75$	]0,75 - 1,25]	]1,25 - 2,00]	$> 2,00$	$\leq 0,75$	]0,75 - 1,50]	$> 1,50$
1b	Juvénile ($L_p < 40$ mm)	0,01 m	0,02	0,02	-	$\leq 0,50$	]0,50 - 1,00]	$> 1,00$	-	$\leq 0,50$	$> 0,50$
2a	Subadulte / Adulte ($L_p > 100$ mm)	0,05 m	0,10	0,15	$\leq 2,00$	]2,00 - 4,00]	]4,00 - 10,0]	$> 10,0$	$\leq 2,00$	]2,00 - 4,00]	$> 4,00$
2b	Juvénile ($L_p < 100$ mm)	0,05 m	0,02	0,05	$\leq 0,75$	]0,75 - 1,25]	]1,25 - 2,00]	$> 2,00$	$\leq 0,75$	]0,75 - 1,50]	$> 1,50$
2c	Subadulte / Adulte ($L_p > 100$ mm)	0,10 m	0,10	0,20	$\leq 1,00$	]1,00 - 4,00]	]4,00 - 10,0]	$> 10,0$	$\leq 1,00$	]1,00 - 4,00]	$> 4,00$
2d	Juvénile ($L_p < 100$ mm)	0,05 m	0,02	0,05	$\leq 0,50$	]0,50 - 1,25]	]1,25 - 2,00]	$> 2,00$	$\leq 0,50$	]0,50 - 1,25]	$> 1,25$
3a	$L_p > 500$ mm	0,05 m	0,40	0,70	$\leq 1,00$	]1,00 - 2,00]	]2,00 - 4,00]	$> 4,00$	$\leq 1,00$	]1,00 - 2,00]	$> 2,00$
3b	$100 \text{ mm} < L_p < 500$ mm	0,02 m	0,10	0,20	$\leq 0,75$	]0,75 - 1,25]	]1,25 - 2,00]	$> 2,00$	$\leq 0,75$	]0,75 - 1,50]	$> 1,50$
3c	$L_p < 100$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4a	Subadulte / Adulte ($L_p > 40$ mm)	0,05 m	0,05	0,10	$\leq 0,75$	]0,75 - 2,00]	]2,00 - 8,00]	$> 8,00$	$\leq 0,75$	]0,75 - 2,00]	$> 2,00$
4b	Juvénile ($L_p < 40$ mm)	0,01 m	0,02	0,02	-	$\leq 0,50$	]0,50 - 1,00]	$> 1,00$	-	$\leq 0,50$	$> 0,50$

Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité des ouvrages routiers ou passages busés par la nage en fonction de leur longueur et des vitesses d'écoulement dans l'ouvrage

Groupe ICE	Famille	Espèce	Nom français (F) / créole (C)	Drom			
				Guadeloupe	Martinique	Mayotte	Réunion
1a	Eleotridae + Gobiidae hors Sicydiinae	<i>Awaous banana</i>	Jolpot (F) / jolpot, loche (C)	X	X		
		<i>Awaous commersoni</i>	Loche des sables (F) / loche, cabot (C)			X	X
		<i>Butis butis</i>	Butis à épaulette noire (F)			X	X
		<i>Ctenogobius pseudofasciatus</i>	-		X		
		<i>Dorminator maculatus</i>	Dormeur (F) / ti-nèg, dormeur (C)	X	X		
		<i>Eleotris amblyopsis</i>	Petit dormeur (F) / pitit dormè (C)	X			
		<i>Eleotris klunzingerii</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X
		<i>Eleotris mauritiana</i>	Éleotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X
		<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X		
		<i>Glossogobius callidus</i>	Gobie comorien (F)			X	
		<i>Glossogobius giurus</i>	Gobie giurus (F) / loche (C)			X	X
		<i>Glossogobius kokiuis</i>	Gobie kokou (F) / loche, cabot (C)				X
		<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X		
		<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X		
		1b		<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éleotris cyprin (F)			X	X
<i>Mugilogobius mertonii</i>	Gobi millet (C)					X	
<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éleotris serpent (F)					X	
<i>Ophiocara porocephala</i>	Éleotris à tête poreuse (F) / makanbale latet ron (C)					X	
<i>Redigobius balteatus</i>	Gobie drapeau (F)					X	
<i>Redigobius bikolanus</i>	Gobi tase (C)					X	
<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)					X	X
2a	Mugilidae			<i>Agonostomus catalai</i>	Mulet comorien (F)		
		<i>Agonostomus monticola</i>	Mulet de montagne (F) / millet (C)	X	X		
2b		<i>Agonostomus telfairii</i>	Mulet enchanteur (F) / chitte (C)			X	X
2c	Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie des rochers (F) / doule de roche, carpe (F)			X	X
		<i>Kuhlia sauvagii</i>				X	X
3a	Anguillidae	<i>Anguilla bengalensis</i>	Anguille marbrée africaine (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
3b		<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolore (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
3c		<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
		<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X
		<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X		
4a	Gobiesocidae + Gobiidae	<i>Cotylopus acutipinnis</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)				X
		<i>Cotylopus rubripinnis</i>	Cotylope à nageoires rouges (F)			X	
4b	Sicydiinae	<i>Gobiesox nudus</i>	Colle-roche (F) / tétard, macouba, colle-roche (C)	X	X		
		<i>Sicydium plumieri</i>	Sicydium de Plumier (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X		
		<i>Sicydium punctatum</i>	Sicydium ponctué (F) / colle-roche, loche, titiri (juvénile) (C)	X	X		
		<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	Cabot bouche ronde, bichique (jeune) (F) (C)			X	X

Les valeurs obtenues pour les groupes ou sous-groupes 1b, 3 et 4 correspondent aux classes de franchissabilité lorsque l'analyse est réalisée en prenant en compte uniquement les capacités de nage des espèces. Dans les cas où l'obstacle présente des zones de reptation, de ventousage ou d'escalade, l'analyse doit également être effectuée à partir des tableaux spécifiques à ces capacités de franchissement (voir chapitres dédiés à ces cas particuliers).



Stade et/ou taille	Tirant d'eau minimum nécessaire pour la nage (h _{min})	Dimensions maximales des redans (m)		Valeurs seuils de vitesses d'écoulement dans l'ouvrage pour le diagnostic (m/s)											
				Louvrage ≤ 20 m				20 m < Louvrage ≤ 50 m				Louvrage > 50 m			
				Classe ICE				Classe ICE				Classe ICE			
				a _{max}	c _{max}	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0
Subadulte / Adulte (L _p > 40 mm)	0,05 m	0,10	0,10	≤ 0,55	]0,55 - 1,00]	]1,00 - 1,50]	> 1,50	≤ 0,50	]0,50 - 0,80]	]0,80 - 1,10]	> 1,10	≤ 0,50	]0,50 - 0,75]	]0,75 - 1,00]	> 1,00
Juvenile (L _p < 40 mm)	0,01 m	0,02	0,02	≤ 0,20	]0,20 - 0,35]	]0,35 - 0,60]	> 0,60	≤ 0,20	]0,20 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	> 0,50	≤ 0,15	]0,15 - 0,30]	]0,30 - 0,50]	> 0,50
Subadulte / Adulte (L _p > 100 mm)	0,05 m	0,10	0,15	≤ 1,50	]1,50 - 2,65]	]2,65 - 4,10]	> 4,10	≤ 1,10	]1,10 - 1,85]	]1,85 - 2,70]	> 2,70	≤ 1,00	]1,00 - 1,55]	]1,55 - 2,15]	> 2,15
Juvenile (L _p < 100 mm)	0,05 m	0,02	0,05	≤ 0,85	]0,85 - 1,15]	]1,15 - 1,50]	> 1,50	≤ 0,70	]0,70 - 0,85]	]0,85 - 1,10]	> 1,10	≤ 0,65	]0,65 - 0,85]	]0,85 - 1,00]	> 1,00
Subadulte / Adulte (L _p > 100 mm)	0,10 m	0,10	0,20	≤ 1,15	]1,15 - 2,45]	]2,45 - 4,10]	> 4,10	≤ 0,90	]0,90 - 1,70]	]1,70 - 2,70]	> 2,70	≤ 0,85	]0,85 - 1,45]	]1,45 - 2,15]	> 2,15
Juvenile (L _p < 100 mm)	0,05 m	0,02	0,05	≤ 0,35	]0,35 - 0,70]	]0,70 - 1,15]	> 1,15	≤ 0,35	]0,35 - 0,60]	]0,60 - 0,90]	> 0,90	≤ 0,35	]0,35 - 0,60]	]0,60 - 0,85]	> 0,85
L _p > 500 mm	0,05 m	0,40	0,70	≤ 1,70	]1,70 - 1,95]	]1,95 - 2,45]	> 2,45	≤ 1,35	]1,35 - 1,55]	]1,55 - 1,75]	> 1,75	≤ 1,15	]1,15 - 1,35]	]1,35 - 1,55]	> 1,55
100 mm < L _p < 500 mm	0,02 m	0,10	0,20	≤ 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
L _p < 100 mm	-	-	-	≤ 0,20				≤ 0,20				≤ 0,15			
Subadulte / Adulte (L _p > 40 mm)	0,05 m	0,05	0,10	≤ 0,85	]0,85 - 1,65]	]1,65 - 2,65]	> 2,65	≤ 0,70	]0,70 - 1,20]	]1,20 - 1,85]	> 1,85	≤ 0,65	]0,65 - 1,10]	]1,10 - 1,55]	> 1,55
Juvenile (L _p < 40 mm)	0,01 m	0,02	0,02	≤ 0,20	]0,20 - 0,35]	]0,35 - 0,60]	> 0,60	≤ 0,20	]0,20 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	> 0,50	≤ 0,15	]0,15 - 0,35]	]0,35 - 0,50]	> 0,50

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité d'un ouvrage routier ou passage busé (Figure 71) sont décrites ci-après.

1. Analyse de l'éventuelle chute aval

Si'il n'y a pas de chute aval, aller en 6.

Si'il existe une chute en aval de l'ouvrage, il faut alors analyser la franchissabilité de celle-ci selon la méthode d'évaluation relative aux seuils verticaux ou quasi-verticaux (commencer l'analyse au point 2 de l'arbre décisionnel dédié, présenté au chapitre portant sur les obstacles verticaux ou quasi-verticaux de pente > 150 %).

Si la chute est totalement infranchissable pour 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), poursuivre en 2.

2. Analyse du tirant d'eau dans l'ouvrage

Si le tirant d'eau dans l'ouvrage $h \geq h_{\min}$ (Tableaux 20 et 21 pages 128 à 131), 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 d'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 sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site dans 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 une des dimensions (a ou c) d'un seul des redans présents dépasse la valeur maximale a_{\max} ou c_{\max} (Tableaux 20 et 21), 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 (a_{\max} ou c_{\max} , Tableaux 20 et 21), aller en 4.

4. Analyse de la pente de l'ouvrage

À partir de la longueur de l'ouvrage ($L \leq 20$ m ou $L > 20$ m) et de sa pente, puis du tableau 20, définir la classe de franchissabilité ICE de l'ouvrage.

Si la classe ICE = NC, aller en 5.

Sinon (Classe ICE \neq NC), aller en 9.

5. Analyse des vitesses d'écoulement

À partir de la longueur de l'ouvrage ($L \leq 20$ m, 20 m < $L \leq 50$ m ou $L > 50$ m) et des vitesses d'écoulement mesurées ou estimées, puis du tableau 21, définir la classe de franchissabilité de l'ouvrage. 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 noyage de l'ouvrage sous le terrain naturel

Regarder si l'ouvrage est entièrement noyé sur sa longueur sous le terrain naturel.

Si l'ouvrage est entièrement noyé sous le terrain naturel, aller en 8.

Sinon, 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, aller en 8.

Sinon, aller en 2.

8. Analyse de la largeur de l'ouvrage

Déterminer la largeur cumulée de l'ouvrage (ex. : somme des largeurs de différents dalots sur un transect transversal) et la comparer à la largeur du lit mouillé du cours d'eau.

Si la largeur cumulée de l'ouvrage est comprise entre 75% et 125% de la largeur du lit mouillé, alors il sera considéré que l'ouvrage est un obstacle au franchissement à impact limité (Classe ICE = 1).

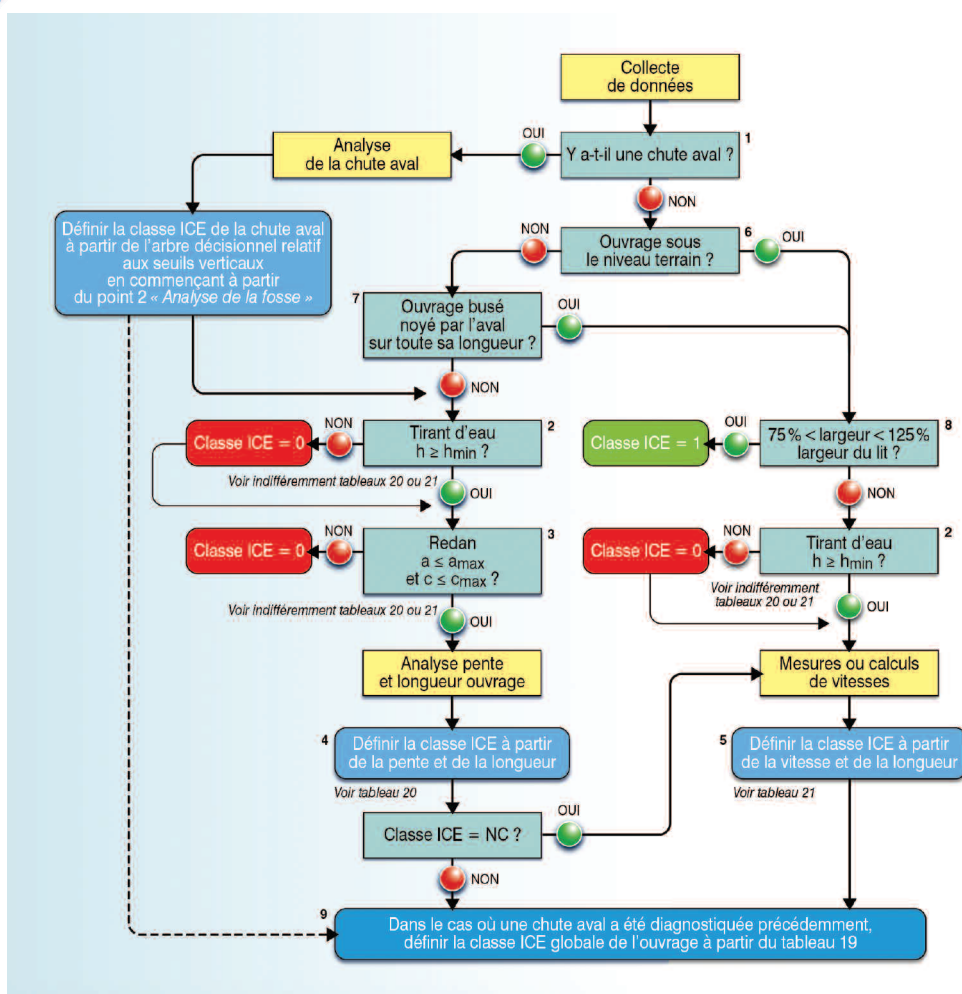
Sinon, vérifier que le point 2 ($h \geq h_{\min}$) est respecté, puis aller en 5. Si ce critère ($h \geq h_{\min}$) n'est pas respecté, alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

9. Analyse de la franchissabilité globale de l'ouvrage

Si l'ouvrage routier ou le passage busé présente une chute aval, définir la classe de franchissabilité ICE globale de l'ouvrage à partir du tableau 19.

Si l'ouvrage ne présente pas de chute aval, alors la classe de franchissabilité ICE globale sera celle obtenue pour l'ouvrage à l'issue des étapes 4 ou 5.

Figure 71



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité piscicole ICE au niveau d'un ouvrage routier ou d'un passage busé.



Cas des ouvrages complexes ou mixtes

Les ouvrages qualifiés de « complexes » ou « mixtes » sont des ouvrages constitués longitudinalement par des matériaux et/ou des configurations différentes (exemple d'un seuil à parement vertical ou incliné en béton prolongé par un seuil en enrochements...) ou correspondant à une série de structures successives constituant, d'un point de vue administratif, un seul et même ouvrage (exemple d'un seuil de moulin présentant un prébarrage en aval, succession de deux seuils etc.).

Dans le cadre de la méthode ICE, il a été décidé de décomposer ces ouvrages complexes en une série d'ouvrages « simples » (Figure 72), puis de déterminer la franchissabilité de chacun de ceux-ci pris séparément afin d'établir, en fin d'analyse, la franchissabilité de l'ensemble de l'ouvrage. Le processus d'analyse est détaillé 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 chapitres dédiés à ces types d'ouvrages).

Décomposition de l'ouvrage dit complexe en une série longitudinale de plusieurs ouvrages « simples »

Chaque ouvrage « simple », en tant qu'élément de l'ouvrage complexe, doit être classé dans un des 5 types suivants :

- obstacle vertical ou quasi-vertical (pente > 150 %) ;
- seuil à parement aval incliné (pente ≤ 150 %) ;
- seuil en enrochements ;
- obstacle constitué d'éléments mobiles ou d'un écoulement en sousverse ;
- ouvrage routier ou ferroviaire.

N.B. La franchissabilité des ouvrages mobiles présentant des écoulements surversants est à déterminer selon la méthodologie dédiée aux obstacles verticaux ou quasi-verticaux (pente > 150 %).

Cette décomposition ne vaut toutefois que si les conditions hydrauliques au niveau de chaque ouvrage « simple » ne sont pas trop influencées par la présence des autres (Figure 73).

En théorie, cette démarche pourrait être appliquée pour une succession illimitée d'éléments ; toutefois, au-delà de trois ou quatre, il est probable que les conditions hydrauliques deviennent trop complexes et ne puissent être appréhendées de façon simple.

Dans de tels cas, 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 réelle de l'ouvrage \leq Classe obtenue par décomposition) et, suivant la classe obtenue, il sera possible de déterminer l'utilité d'avoir recours à une modélisation hydraulique (voir également l'exemple de la figure 73).

Figure 72



a, b © P. Valade (Ocea Consult')

Exemples d'ouvrages complexes pouvant être décomposés en une succession d'ouvrages « simples ».
 (a) Ouvrage pouvant être décomposé comme un seuil à parement incliné présentant en aval un seuil en enrochements (rivière Pérou, Guadeloupe), (b) Ouvrage pouvant être décomposé comme une succession de deux seuils inclinés (rivière Saint-Louis, Guadeloupe).

Figure 73



© B. Voegtli (Ecogea)

Exemple d'ouvrage complexe ne pouvant pas être décomposé en plusieurs ouvrages « simples ».
 Pour ce cas (c.-à-d. écoulements sous vanne en charge poursuivis par un seuil à parement incliné en aval), l'ouvrage ne peut pas être décomposé en 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, puisque le passage sous la vanne est d'ores et déjà infranchissable. L'ouvrage peut donc globalement être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

Définition des classes de franchissabilité de chacun des ouvrages individualisés

Les classes de franchissabilité de chacun des ouvrages « simples » seront définies en suivant les méthodologies adaptées à chacun des types correspondants, détaillées dans les chapitres précédents.

Définition de la classe de franchissabilité globale de l'ouvrage dit complexe

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 22 présente les résultats dans le cas où l'ouvrage est constitué d'une série de deux ouvrages « simples ».

Tableau 22 Détermination de la classe de franchissabilité ICE globale d'un ouvrage complexe constitué par une série de 2 ouvrages « simples ».

		Note ICE de l'ouvrage aval				
		0	0,33	0,66	1	NC
Note ICE de l'ouvrage amont	0	0	0	0	0	0
	0,33	0	0	0,33	0,33	NC ($\leq 0,33$)
	0,66	0	0,33	0,33	0,66	NC ($\leq 0,66$)
	1	0	0,33	0,66	1	NC
	NC	0	NC ($\leq 0,33$)	NC ($\leq 0,66$)	NC	NC

Pour une décomposition en n ouvrages « simples », la classe de franchissabilité de l'ouvrage total correspondra à celle de l'ouvrage « simple » le plus impactant dégradée d'une classe dès lors qu'il existe *minima* trois éléments présentant une classe de franchissabilité ICE inférieure à 1.

Si seulement 2 des n éléments de l'ouvrage sont déclassants (les autres éléments ayant une classe de franchissabilité ICE = 1), le tableau 22 sera utilisé.

À titre d'exemples :

- un ouvrage complexe constitué de n ouvrages « simples » ayant chacun une classe de franchissabilité ICE de 0,66 pourra être considéré comme une barrière à impact majeur (classe ICE de l'ouvrage global = 0,33 ; utilisation du tableau 22 si $n = 2$ ou dégradation d'une classe de l'élément le plus déclassant si $n \geq 3$) ;
- un ouvrage complexe constitué de n ouvrages « simples » ayant chacun une classe de franchissabilité ICE de 0,33 pourra être considéré comme une barrière totale (classe ICE de l'ouvrage global = 0 ; utilisation du tableau 22 si $n = 2$ ou dégradation d'une classe de l'élément le plus déclassant si $n \geq 3$) ;
- un ouvrage complexe constitué de 4 ouvrages « simples » ayant respectivement une classe de franchissabilité ICE de 0,33 - 0,66 - 0,66 et 1 pourra être considéré comme une barrière totale (classe ICE de l'ouvrage global = 0 ; dégradation d'une classe de l'élément le plus déclassant) ;
- un ouvrage complexe constitué de 4 ouvrages « simples » ayant respectivement une classe de franchissabilité ICE de 0,33 - 0,66 - 1 et 1 pourra être considéré comme une barrière à impact majeur (classe ICE de l'ouvrage global = 0,33 ; utilisation du tableau 22).





Le cas particulier de l'anguille

Approche spécifique

■ Généralités

À la montaison, l'anguille est capable de franchir les obstacles en utilisant **deux modes potentiels de déplacement** :

- **soit la nage**, dans des écoulements à vitesses relativement faibles et tirant d'eau suffisant ;
- **soit la reptation**, sur des surfaces très faiblement alimentées en eau.

■ Taille des individus et modes de franchissement

Les plus petites anguilles (stade civelle) sont capables de franchir « par escalade » des parois verticales, sans avoir besoin d'appuis, en utilisant les forces de tension superficielle entre leurs corps et la paroi humide, qui permettent de contrecarrer la force de pesanteur. Au cours de leur croissance, le rapport poids / tension superficielle augmente, ce qui explique que seuls les plus petits individus peuvent utiliser ce mode de progression.

Les stades plus avancés 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.

Pour prendre en compte les spécificités de chacun de ces stades, **trois sous-groupes ont été distingués** :

- **le sous-groupe 3a**, correspondant aux anguilles « jaunes » d'anguilles marbrées *Anguilla marmorata*, et aux gros individus des autres espèces qui auraient besoin de recoloniser le milieu suite à des périodes de crues ou de sécheresse intenses (individus de taille supérieure à 500 mm). Ces individus présentent une forte puissance musculaire, liée à leur grande taille ;
- **le sous-groupe 3b**, correspondant aux anguilles « jaunes » de taille comprise entre 100 et 500 mm, toutes espèces confondues ;
- **le sous-groupe 3c**, correspondant aux plus jeunes stades (individus de taille inférieure à une dizaine de centimètres, correspondant généralement au stade civelle).

■ Critères de franchissement

Au vu de ses capacités de nage, il peut être considéré que tout ouvrage présentant une chute constitue un obstacle majeur pour le stade « civelle et jeune anguillette » (groupe 3c), dès lors que celui-ci doit franchir l'ouvrage par la nage.

Pour le stade « anguillette et anguille jaune » (groupe 3b), des limites de classe de franchissabilité ont été définies, comme pour toutes les autres espèces, dans les tableaux associés aux différents arbres décisionnels (voir chapitres précédents, dédiés à chaque type d'ouvrages).

Cependant, le **diagnostic de la franchissabilité d'un ouvrage par les anguilles doit prendre en compte les capacités spécifiques de reptation des espèces (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 pour l'outre-mer est similaire à celle présentée dans la méthodologie métropolitaine ; elle consiste dans un premier temps à vérifier l'existence d'une ou plusieurs voies de reptation potentielle pour le poisson, puis d'apprécier la franchissabilité de cette ou ces voies à partir de deux paramètres simples à mesurer ou à estimer : la distance à franchir et la pente de la voie de reptation analysée.

Existence d'une voie de passage par reptation

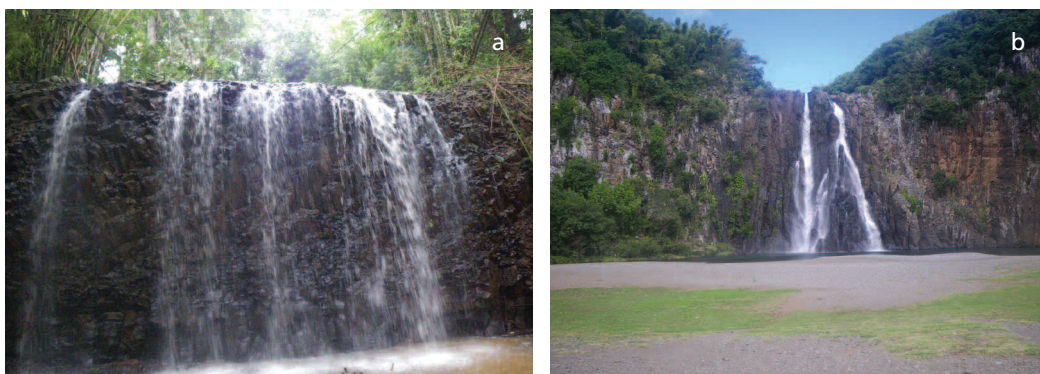
La présence de rugosités sur un substrat peut aider l'anguille à progresser, en particulier sur les fortes pentes. L'efficacité de ces éléments de rugosités dépend de leur taille dans plusieurs dimensions et de leur espacement dans différentes directions.

La présence de zones propices au repos des individus sur la voie de passage peut également aider fortement au franchissement.

Une part de la population peut franchir certaines chutes naturelles de fortes hauteurs (plusieurs dizaines de mètres), notamment lorsque celles-ci sont présentes en partie aval de cours d'eau et que la population migratoire est majoritairement constituée des plus jeunes stades (meilleures capacités de reptation / escalade sur parois verticales pour les civelles, voir ci-après). De plus, sur ces chutes, de multiples anfractuosités offrent des petites cuvettes ou des mini replats humidifiés et dans ou sur lesquelles des individus de petites tailles peuvent se « reposer » pendant le franchissement de l'obstacle (Figure 74).

Sur un ouvrage anthropique, la configuration des écoulements est généralement plus uniforme et les zones de repos le long d'une voie de reptation potentielle plus limitées, voire absentes.

Figure 74



a, b © B. Voegtli (Ecogea)

Exemples de chutes naturelles créant des zones potentielles de repos (anfractuosités) et assurant une certaine franchissabilité pour les civelles.

(a) Cascade Boungoumouhé (Mayotte), (b) Cascade Niagara (La Réunion).

La combinaison de ces paramètres difficiles à évaluer (éléments de rugosité, zones de repos) et leur hétérogénéité à l'échelle d'un ouvrage rendent ces critères très difficiles à intégrer à la méthode ICE.

Il a donc été décidé de ne pas intégrer le paramètre « rugosité » dans la recherche et dans l'analyse des voies de reptation potentiellement exploitables par l'anguille, à l'échelle de l'ouvrage.

Une voie de reptation potentielle se caractérise par la présence d'une zone continue à faible tirant d'eau sur l'ouvrage (respectivement inférieur à 5, 2 et 1 cm pour les sous-groupes 3a, 3b et 3c) (Figure 75).



N.B. Il est possible de considérer qu'une voie de reptation pour les anguilles est aussi une voie de ventousage potentielle pour les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques et une voie de marche pour les macro-crustacés.

Figure 75



a, c, d, e, f © B. Voegtli (Ecogea)
b © P. Valade (Ocea Consult)

Exemples de voies de reptation potentielles à analyser pour l'anguille (matérialisées par les tirets rouges). Ces voies sont également des voies potentielles de ventousage pour les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques et des voies de marche pour les macro-crustacés (ouvrages visibles à La Martinique, à Mayotte, à La Réunion).

Attention. En complément des possibilités potentielles de passage par reptation en bordure d'écoulements, l'anguille peut également et théoriquement utiliser ses seules capacités de nage pour franchir l'obstacle. Aussi, en parallèle à l'analyse de la franchissabilité d'un ouvrage par les voies de reptation, il sera toujours nécessaire de se rapporter également aux arbres décisionnels définis précédemment (voir chapitres précédents dédiés à chaque type d'ouvrage) pour les anguilles jaunes et anguillettes (sous-groupes 3a et 3b). Pour le stade civelle (sous-groupe 3c), qui ne présente pas de réelles capacités de nage, l'analyse du franchissement par nage n'est pas nécessaire.

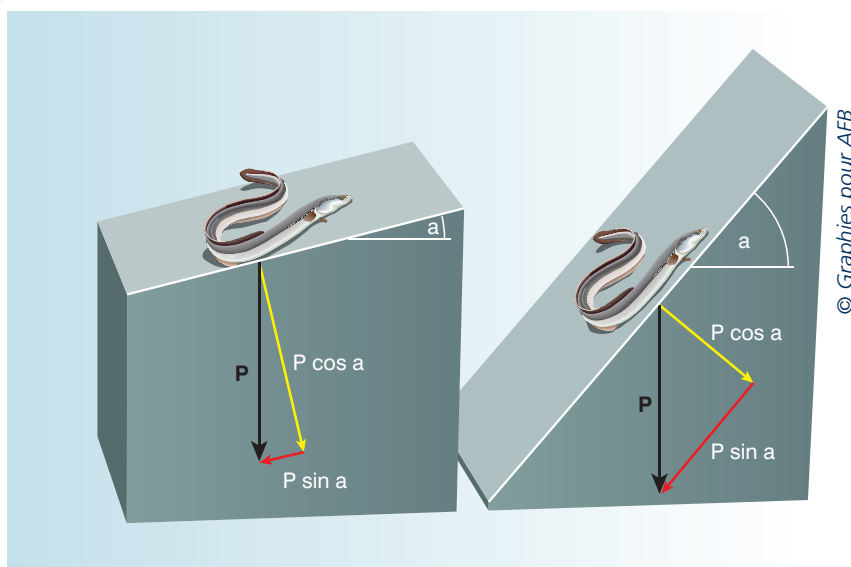
Pente

Sur la base de résultats issus des expérimentations menées sur des équipements pilotes (Legault, 1992 ; Voegtli et Larinier, 2000 ; Lagarde *et al.*, 2016), il a été considéré que la pente de la voie de reptation potentielle constituait le principal critère à prendre en compte pour caractériser la franchissabilité potentielle d'un obstacle.

En considérant 'a' comme la pente du substrat (exprimée en unité d'angle, °), le poids du poisson peut être décomposé en une composante normale ($P \cdot \cos 'a'$) et une composante tangentielle ($P \cdot \sin 'a'$) (Figure 76). 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 $\cos 'a'$ (Tableau 23).

Pour les pentes les plus faibles, inférieures ou égales à 20-30 % (ex : 15° dans 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, et elle n'a pas à recourir à la tension superficielle (Figure 76). Cette gamme de faibles pentes correspond également à des conditions d'écoulement en nappe, au travers desquelles l'anguille peut éventuellement progresser plus rapidement en nageant, si la charge le permet.

Figure 76



© Graphies pour AFB

Décomposition du poids d'une anguille en deux composantes : une composante favorable au maintien du poisson contre la paroi (en jaune) et une composante défavorable (en rouge). D'après Baudoin *et al.*, 2014.



Avec l'augmentation de la pente, les anguilles auront de plus en plus d'efforts à fournir pour progresser. À partir de pentes de 100-175 % (45°-60°), les individus 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 sont favorisés. Des rugosités présentes sur la zone de reptation peuvent alors les aider à progresser. L'efficacité des rugosités dépend de leur taille dans plusieurs dimensions et de leur espacement dans différentes directions, en lien avec la taille des individus, qui doivent trouver suffisamment d'appuis pour progresser sans que ceux-ci soient trop resserrés.

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 généralement pas être mesurés précisément.

A contrario, le dévers latéral de la voie de reptation peut fortement limiter les capacités de progression de l'anguille.

Tableau 23

Ordre de grandeur des paramètres favorables (cos 'a') et défavorable (sin 'a') au franchissement par reptation de l'anguille, en fonction de la pente de l'obstacle. D'après Baudoin et al., 2014

	Pente (% et équivalent en °)									
	14 %	32 %	48 %	100 %	130 %	173 %	230 %	300 %	500 %	∞
	8°	18°	26°	45°	53°	60°	66°	72°	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

N.B. L'évaluation de la franchissabilité par reptation devra prendre en compte la plus forte pente entre la pente longitudinale et le dévers latéral de la voie de franchissement (Figure 75e page 139).

Distance à franchir

De façon pragmatique, et en l'état actuel des connaissances, il a été considéré, comme pour le cas de l'anguille européenne dans la méthode ICE adaptée à la métropole, que plus la distance à franchir est importante 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.

Pour chaque stade biologique, 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.

Si la voie de reptation est hétérogène (différentes pentes), les différentes parties devront être distinguées et analysées séparément.

C'est ainsi que, comme pour l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*, Figure 77a), *A. rostrata* en Martinique et en Guadeloupe, *A. marmorata*, *A. mossambica* (Figure 77b), *A. bicolor bicolor* et *A. bengalis* à La Réunion et à Mayotte présentent des capacités de franchissement par reptation dépendantes de la taille des individus et de la configuration de l'obstacle.

Figure 77



(a) Anguille européenne : civelle et anguilllette (*A. anguilla*), (b) Anguille du Mozambique (*A. mossambica*)

a © V. Marty, AFB
b © P. Valade, Ocea Consult'

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Les tableaux 24, 25 et 26 présentent les classes de franchissabilité en fonction de la pente et de la distance à franchir pour les 3 sous-groupes d'anguilles.

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (78 page 145), présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité d'un ouvrage donné.



Tableau 24

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une zone de reptation pour le sous-groupe 3a (anguilles de longueur > 500 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

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	1	0,66	0,33	0,33	0	0
100 < P ≤ 150	1	0,66	0,33	0,33	0	0	0
150 < P ≤ 300	1	0,66	0,33	0	0	0	0
300 < P ≤ ∞	1	0,33	0	0	0	0	0

Tableau 25

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une zone de reptation pour le sous-groupe 3b (anguilles de longueur comprise entre 100 et 500 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

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
300 < P ≤ ∞	0,66	0,33	0	0	0	0	0

Tableau 26

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une zone de reptation pour le sous-groupe 3c (civelles de longueur < 100 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

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
300 < P ≤ ∞	0,66	0,66	0,66	0,33	0	0	0

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité d'un ouvrage par reptation pour l'anguille sont décrites ci-après.

1. Existence d'une voie de passage par reptation

Si existe une (ou plusieurs) voie(s) continue(s) à faible tirant d'eau (< 5 cm environ pour le sous-groupe 3a, < 2 cm environ pour le sous-groupe 3b et < 1 cm pour le sous-groupe 3c), alors effectuer un profil en long au niveau de cette (ces) voie(s) de passage potentielle(s) (ou uniquement de la voie potentielle qui paraît la plus favorable) et aller en 2.

Sinon, l'anguille est obligée d'utiliser ses capacités de nage ; aller directement en 3.

S'il n'est pas possible d'identifier une voie de passage, il peut être intéressant d'apprécier la 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 2), il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site à des débits différents.

2. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par la reptation

Au préalable, définir la classe de franchissabilité ICE à partir de la longueur totale cumulée et de la pente moyenne de chacune des voies de reptation, en utilisant les tableaux 24 à 26 page 143.

Si la voie de reptation analysée est décomposée en plusieurs parties, déterminer la classe de franchissabilité ICE de chaque partie en utilisant également les tableaux 24 à 26. Si une ou plusieurs parties présente(nt) une classe de franchissabilité ICE plus faible que la classe obtenue lors de l'analyse globale de la voie, alors retenir la classe de la partie la plus déclassante.

S'il existe plusieurs voies de passage potentielles, faire le même exercice pour chaque voie et retenir, à l'échelle de l'ouvrage, la classe de franchissabilité ICE de la voie la moins déclassante.

Puis aller en 3.

3. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par la nage (en cas d'absence ou en complément de voie(s) de reptation existante(s))

Pour les stades anguilllette et anguille jaune, analyser la franchissabilité par la nage en utilisant les arbres décisionnels relatifs aux différents types d'ouvrages, selon la même méthodologie que pour les autres espèces piscicoles.

Pour le stade civelle, l'obstacle sera considéré comme une barrière totale (classe ICE = 0).

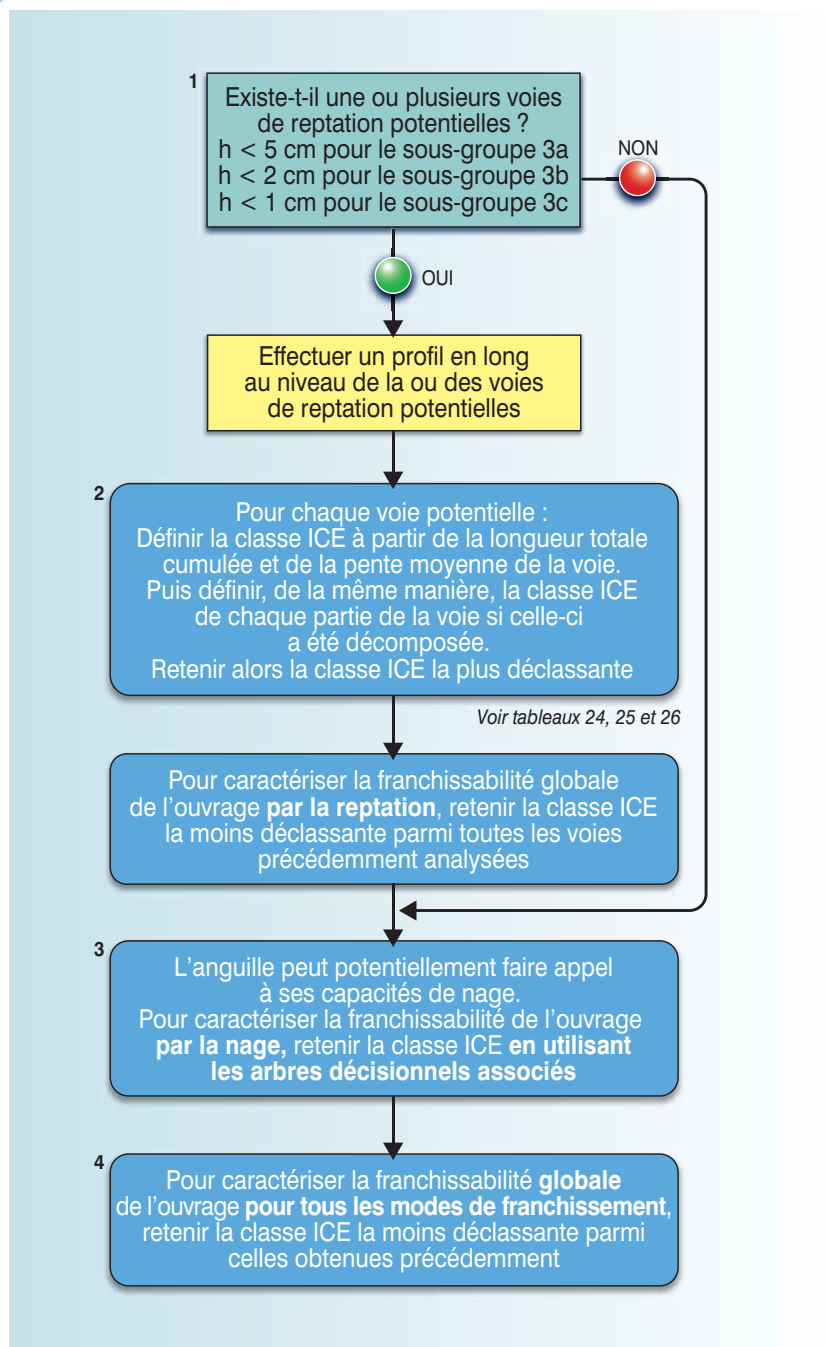
Aller en 4.

4. Détermination de la franchissabilité globale de l'ouvrage en prenant en compte l'ensemble des modes de franchissement

Retenir à l'échelle de l'ouvrage la classe de franchissabilité ICE la moins déclassante entre celle retenue pour le franchissement par la reptation (à l'issue du point 2) et celle(s) retenue(s) pour le franchissement par la nage (à l'issue du point 3).



Figure 78



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour le franchissement par reptation chez les anguilles.



Le cas particulier du ventousage et de l'escalade par les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques

Approche spécifique

■ Généralités

Les espèces de *Gobiidae Sicydiinae* (groupe 4), dont les nageoires ventrales sont soudées et forment une ventouse, peuvent utiliser cette ventouse pour franchir des parois abruptes, en s'aidant également de leur bouche et/ou de leurs nageoires pectorales.

Ce mode de progression par « ventousage » est majoritairement utilisé par ces espèces dès lors que le tirant d'eau ou les vitesses d'écoulement sont incompatibles avec leurs capacités de nage.

De plus, les stades post-larvaires et les juvéniles de petites espèces benthiques (sous-groupe 1b) sont capables d'utiliser les forces de tension superficielles pour franchir des obstacles sub-verticaux *via* la zone humide bordant le lit mouillé.

Au cours de leur croissance, comme pour l'anguille, le rapport poids / tension superficielle augmente, ce qui explique que, plus les individus sont petits, plus leur faculté à progresser sur des parois verticales est importante. C'est pourquoi, pour les espèces benthiques du groupe 1, seuls les post-larves et les juvéniles sont capables de progresser par « escalade ».

■ Taille et spécificités des individus

Pour prendre en compte les spécificités de chacun de ces stades et/ou groupes d'espèces, **trois sous-groupes ont été distingués** :

- **le sous-groupe 1b**, correspondant aux stades post-larvaires et juvéniles des petites espèces benthiques du groupe 1, c'est-à-dire aux *Eleotridae* et aux *Gobiidae* (hors *Sicydiinae*) ;
- **le sous-groupe 4a**, correspondant aux subadultes ou adultes de *Sicydiinae*. La taille des individus varie globalement de 40 à 150 mm ;
- **le sous-groupe 4b**, correspondant aux post-larves et juvéniles de *Sicydiinae*. La taille des individus varie, en fonction des espèces, de 15 à 40 mm.



■ Critères de franchissement

Des limites de classe de franchissabilité ont été définies, comme pour toutes les autres espèces, dans les tableaux associés aux différents arbres décisionnels (voir chapitres précédents dédiés à chaque type d'ouvrages).

Cependant, **le diagnostic de la franchissabilité d'un ouvrage pour ces 3 sous-groupes (1b, 4a et 4b) doit prendre en compte les capacités spécifiques de ventousage et d'escalade.** Il est donc apparu nécessaire de définir des critères de franchissement spécifiques à ces modes de progression.

La méthode proposée est relativement similaire à celle déclinée précédemment pour l'évaluation du franchissement par reptation des anguilles. Elle consiste dans un premier temps à vérifier l'existence d'une ou plusieurs voies de ventousage ou d'escalade potentielle(s) pour le poisson, puis d'apprécier la franchissabilité de cette (ces) voie(s) à partir de deux paramètres simples à mesurer ou à estimer : la distance à franchir et la pente de la voie de passage. Si la voie de ventousage et d'escalade est hétérogène (différentes pentes), les différentes parties devront être distinguées et analysées séparément.

Existence d'une voie de passage par ventousage et escalade

La présence de zones propices au repos des individus sur la voie de passage peut également aider fortement les individus. C'est pourquoi, à l'instar des jeunes stades d'anguilles, une part de la population peut franchir certaines chutes naturelles de fortes hauteurs (plusieurs dizaines de mètres), notamment lorsque celles-ci sont présentes en partie aval de cours d'eau et que la population migratoire est majoritairement constituée des plus jeunes stades (meilleures capacités de ventousage et d'escalade sur parois verticales pour les petits sujets, voir ci-après).

Il n'existe que très peu de données objectives sur les conditions de franchissement *in situ* des obstacles naturels et anthropiques par les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles des petites espèces benthiques, sachant que ces informations sont très difficiles à acquérir sans recours à des moyens logistiques et humains très lourds. Ceci est notamment dû à l'extrême variabilité des facteurs susceptibles d'influencer le franchissement d'un obstacle en milieu naturel : convergence d'un flux migratoire et de conditions hydrologiques favorables au franchissement de l'ouvrage, état physiologique des poissons, hétérogénéité de la configuration des obstacles à franchir, fortes hétérogénéités des conditions hydrauliques...

Toutefois les études sur pilote expérimental, menées notamment à la Réunion (Voegtli *et al.*, 2000 ; Lagarde *et al.*, 2016), montrent (*a minima* pour les *Sicydiinae*) notamment que :

- quelles que soient la pente et les conditions d'alimentation, le type de support semble avoir une influence modérée sur les capacités de franchissement, même si les poissons préfèrent clairement les surfaces plutôt lisses (roche naturelle, béton, acier) aux supports trop rugueux qui compliquent le ventousage ;
- la montaison est meilleure lorsque les poissons bénéficient d'un support juste humidifié (tirant d'eau très réduit) ;
- le pourcentage de réussite est d'autant plus faible que la pente est forte. En moyenne, 58 % des poissons sont montés à 50°, 45 % sont montés à 70° et seulement 20 % sont montés à 90°.

Une voie de ventousage et d'escalade se caractérise par la présence d'une zone continue à faible tirant d'eau (< 1 cm) entre l'aval et l'amont de l'ouvrage. Aussi, il est globalement possible de considérer que cette voie pour les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques est une voie de reptation potentielle pour les civelles et de marche pour les macro-crustacés (Figure 75 page 139).

Attention. En complément de leurs capacités de ventousage et d'escalade, les poissons peuvent utiliser également leurs seules capacités de nage pour franchir l'obstacle. Il conviendra alors, pour chacun des sous-groupes, de se rapporter aux arbres décisionnels définis précédemment (voir les chapitres précédents dédiés à chaque type d'ouvrages).

Pente

Sur la base, notamment, des résultats issus d'expérimentations menées sur des équipements pilotes (Voegtli *et al.*, 2002 ; Lagarde *et al.*, 2016), il a été considéré que la pente de la voie de ventousage et d'escalade potentielle constituait le principal critère à prendre en compte pour caractériser la franchissabilité potentielle d'un obstacle.

Comme pour l'anguille, pour les pentes les plus faibles ($\leq 20-30\%$), le poisson n'a à vaincre qu'une faible fraction de son poids lorsqu'il se déplace. Plus de 90 % de son poids lui sert à rester plaqué, ce qui fait qu'il n'a quasiment pas à recourir à la tension superficielle ou au ventousage (Figure 76 et Tableau 23 pages 140 et 141). Avec l'augmentation de la pente, les poissons auront de plus en plus d'efforts à fournir pour progresser. À partir de pentes de 100-175 % ($45^\circ-60^\circ$), les individus 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 et le ventousage peut alors les aider à se maintenir sur le substrat.

Dans ces conditions, les plus petits individus sont favorisés.

NB L'évaluation de la franchissabilité par ventousage et escalade devra prendre en compte la plus forte pente entre la pente longitudinale et le dévers latéral de la voie de franchissement (Figure 75 page 139).

Distance à franchir

De façon pragmatique, et en l'état actuel des connaissances, il a été considéré, comme pour le cas de l'anguille, que plus la distance à franchir est importante plus la probabilité pour les poissons de rencontrer des conditions de vitesses excessives, des charges inadaptées, des ruptures de pente incompatibles avec leurs capacités d'escalade ou de ventousage augmente. De plus, l'individu se fatiguera d'autant plus vite que la pente sera importante.

Pour chaque sous-groupe, 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 ventousage et d'escalade potentielle, la longueur à franchir et la pente du parement.

Si la voie de ventousage et d'escalade est hétérogène (différentes pentes), les différentes parties devront être distinguées et analysées séparément.

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Les tableaux 27, 28 et 29 présentent les classes de franchissabilité en fonction de la pente et de la distance à franchir.

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 79 page 151), présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité d'un ouvrage donné.



Tableau 27

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie d'escalade pour le sous-groupe 1b (post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques, c'est-à-dire Eleotridae et Gobiidae hors Sicydiinae) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

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 ≤ 75	1	1	1	1	1	0,66	0,66
75 < P ≤ 150	1	1	1	1	0,66	0,66	0,33
150 < P ≤ 300	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
300 < P ≤ 600	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0
600 < P ≤ ∞	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0	0

Tableau 28

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de ventousage pour le sous-groupe 4a (sub-adultes et adultes de Gobiidae Sicydiinae) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

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 ≤ 75	1	1	1	1	1	1	0,66
75 < P ≤ 150	1	1	1	1	1	0,66	0,66
150 < P ≤ 300	1	1	1	1	0,66	0,66	0,33
300 < P ≤ 600	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
600 < P ≤ ∞	1	1	1	0,66	0,33	0,33	0,33

Tableau 29

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de ventousage pour le sous-groupe 4b (post-larves et juvéniles de Gobiidae Sicydiinae) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

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 ≤ 150	1	1	1	1	1	1	1
150 < P ≤ 300	1	1	1	1	1	1	0,66
300 < P ≤ 600	1	1	1	1	1	0,66	0,66
600 < P ≤ ∞	1	1	1	1	0,66	0,66	0,66

N.B. Certains ouvrages ou certaines chutes naturelles peuvent présenter des voies potentielles de passage en dévers ou surplomb plus ou moins prononcés. Dans certains cas de figure, et dès lors que le substrat reste encore humidifié, il est possible que la voie de passage assure encore une certaine franchissabilité des individus (notamment dans le cas des *Sicydiinae*). À l'heure actuelle, et au vu de la forte variabilité de configurations de dévers possible (pente du surplomb, présence de cassures franches...), il est difficile de pouvoir établir des critères simples pour définir le degré de franchissabilité de ces voies potentielles. Dans ce cas, la définition de la classe de franchissabilité devra recourir à une expertise de la part de l'opérateur.

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité d'un ouvrage par le ventousage ou l'escalade pour les *Sicydiinae* ou les posts-larves et juvéniles des petites espèces benthiques (sous-groupes 1b, 4a et 4b) sont décrites ci-après.

1. Existence d'une voie de passage par ventousage et escalade

S'il existe une (ou plusieurs) voie(s) continue(s) à faible tirant d'eau (< 1 cm environ), alors effectuer un profil en long au niveau de chacune de ces voies de passage potentielles (ou uniquement de la voie potentielle qui paraît la plus favorable) et aller en 2.

Sinon, les poissons sont obligés d'utiliser leurs capacités de nage ; aller directement en 3.

S'il n'est pas possible d'identifier une voie de passage, il peut être intéressant d'apprécier la franchissabilité pour des conditions hydrologiques plus favorables, pouvant se traduire par l'apparition d'une voie de ventousage et d'escalade. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse (aller en 2), il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site à des débits différents.

2. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par le ventousage et l'escalade

Au préalable, définir la classe de franchissabilité ICE à partir de la longueur totale cumulée et de la pente moyenne de chacune des voies de passage, en utilisant les tableaux 27 à 29 page 149.

Si la voie de ventousage et d'escalade analysée est décomposée en plusieurs parties, déterminer la classe de franchissabilité ICE de chaque partie en utilisant également les tableaux 27 à 29. Si une ou plusieurs parties présente(nt) une classe de franchissabilité plus faible que la classe obtenue lors de l'analyse globale de la voie, alors retenir la classe de la partie la plus déclassante.

S'il existe plusieurs voies de passage potentielles, faire le même exercice pour chaque voie et retenir à l'échelle de l'ouvrage, la classe de franchissabilité ICE de la voie la moins déclassante.

Puis aller en 3.

3. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par la nage (en cas d'absence ou en complément de voie(s) de ventousage et d'escalade existante(s))

Analyser la franchissabilité par la nage en utilisant les arbres décisionnels relatifs aux différents types d'ouvrages, selon la même méthodologie que pour les autres espèces piscicoles.

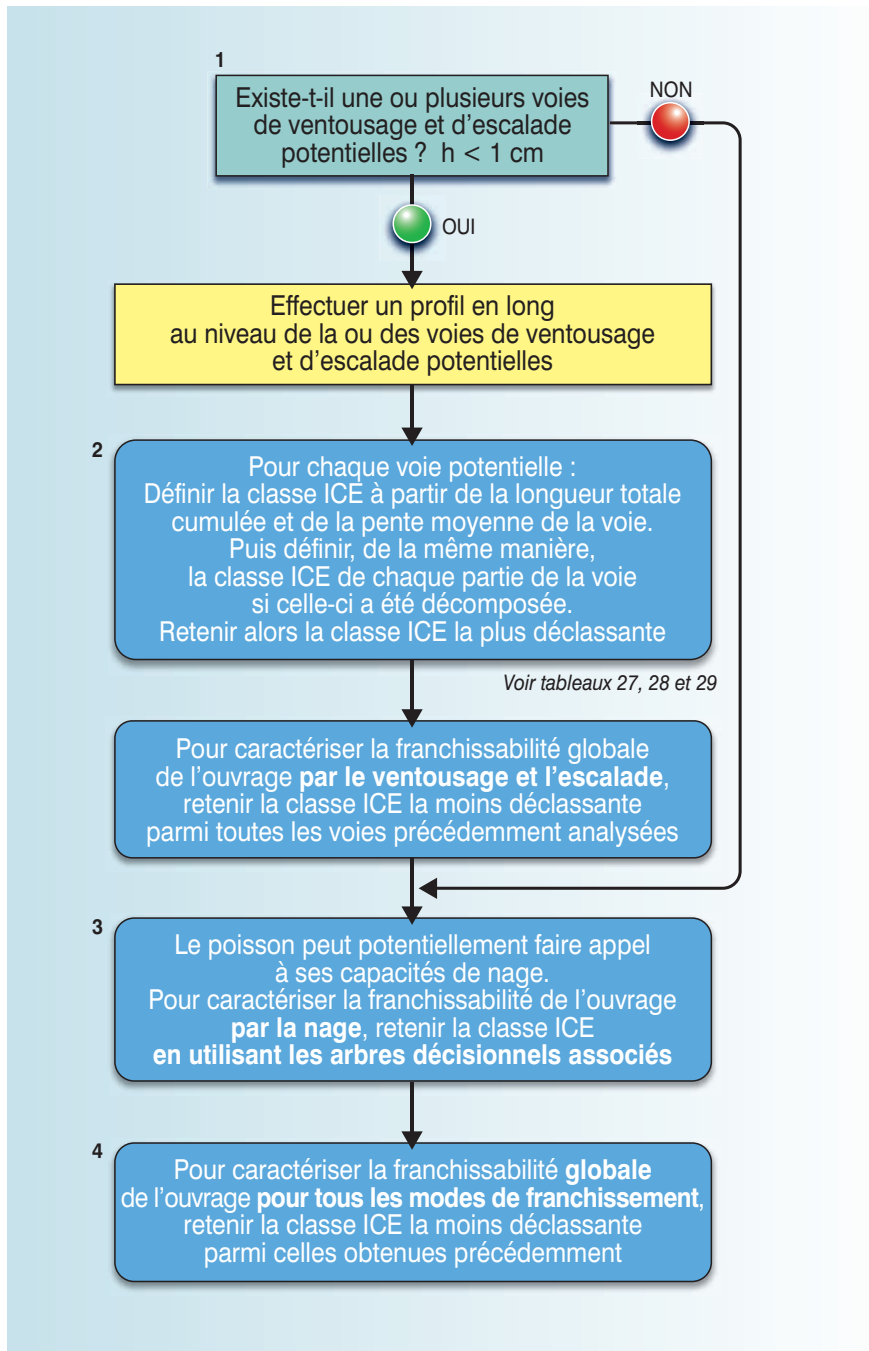
Aller en 4.

4. Détermination de la franchissabilité globale de l'ouvrage en prenant en compte l'ensemble des modes de franchissement

Retenir à l'échelle de l'ouvrage la classe de franchissabilité ICE la moins déclassante entre celle retenue pour le franchissement par le ventousage et l'escalade (à l'issue du point 2) et celle(s) retenue(s) pour le franchissement par la nage (à l'issue du point 3).



Figure 79



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour le franchissement par ventousage et escalade chez les Sicydiinae ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques.



Le cas particulier de la marche par les macro-crustacés

Approche spécifique

■ Généralités

Les macro-crustacés décapodes (groupe 5) ont de faibles capacités de nage ou de saut (hormis quelques cas particuliers comme *Xiphocaris elongata*).

En revanche, ils possèdent de très bonnes capacités de franchissement par marche, du fait des 5 paires de pattes (périopodes) dont ils disposent. Ce mode de progression est majoritairement utilisé par ces espèces dès lors que le tirant d'eau devient très faible ou que les vitesses d'écoulement deviennent fortes par rapport à leurs capacités de nage.

Il est donc pragmatique de considérer que ces espèces trouveront des conditions de franchissement plus favorables à leurs passages en bordure d'écoulements (vitesses d'écoulement et turbulences plus faibles) que dans les zones plus lotiques.

Les crustacés utilisent principalement 3 paires de pattes pour se déplacer : les périopodes P3, P4 et P5, mais peuvent également s'agripper avec les pinces terminales des périopodes P1. Cette technique de franchissement permet aux individus de petites tailles de franchir des parois humides verticales, voire en surplomb.

Pour les espèces du genre *Macrobrachium*, les relativement grandes tailles (et poids) des adultes peuvent diminuer leurs capacités de franchissement sur des parois verticales ou subverticales notamment, en comparaison aux capacités des juvéniles. En revanche, pour les petites espèces des familles des *Atyidae* ou des *Xiphocarididae*, du fait de la faible taille des individus adultes, les capacités de franchissement ne diminuent pas significativement lors de la croissance.

■ Spécificités des individus

Pour prendre en compte les spécificités de chacun de ces stades et/ou espèces, **deux sous-groupes ont été distingués** :

■ **le sous-groupe 5a**, correspondant aux adultes et subadultes des espèces du genre *Macrobrachium* et aux crabes d'eau douce amphidromes (*Grapsidae*). Ces individus possèdent de fortes capacités de franchissement sur des voies humides, mais seront limités par des parois verticales, notamment sur de longues distances ;

■ **le sous-groupe 5b**, correspondant aux espèces d'*Atyidae*, de *Xiphocarididae* (tous stades) ainsi qu'aux juvéniles du groupe 5a. Ces espèces et stades possèdent des capacités de franchissement supérieures au sous-groupe 5a pour le franchissement de paroi humides verticales, voire en surplomb.



■ Critères de franchissement

La méthode proposée est relativement similaire à celles déclinées précédemment pour les individus présentant des capacités spécifiques de reptation ou de ventousage / escalade.

Elle consiste dans un premier temps à vérifier l'existence d'une ou plusieurs voies de marche potentielle(s) pour les macro-crustacés, puis d'apprécier la franchissabilité de cette (ces) voies à partir de deux paramètres simples à mesurer ou à estimer : la distance à franchir et la pente de la voie(s) de passage. Si la voie de marche est hétérogène (différentes pentes), les différentes parties devront être distinguées et analysées séparément.

Existence d'une voie préférentielle de passage par marche

Il n'existe que très peu de données objectives sur les conditions de franchissement *in situ* des obstacles naturels et artificiels par les macro-crustacés, sachant que ces informations sont très difficiles à acquérir sans recours à des moyens logistiques et humains très lourds compte tenu de l'extrême variabilité des facteurs susceptibles d'influencer le franchissement d'un obstacle en milieu naturel : convergence d'un flux migratoire et de conditions hydrologiques favorables au franchissement de l'obstacle, état physiologique des individus, hétérogénéité de la géométrie des obstacles, hétérogénéité des conditions hydrauliques...

Malgré l'absence de données, les observations visuelles d'individus en progression (Voegtli et Valade, *obs. pers.*) **plaident pour caractériser une voie préférentielle de passage par marche comme une zone continue à faible tirant d'eau (< 1 cm) de l'aval à l'amont de l'ouvrage.** On peut donc globalement considérer que la voie de passage préférentiel par marche des macro-crustacés est similaire aux voies de ventousage, d'escalade et de reptation des civelles (Figure 75 page 139).

N.B. Généralement, un obstacle anthropique génère des écoulements peu propices au franchissement direct par marche dans les veines principales d'écoulement (jet plongeant, écoulement à fortes vitesses), ce qui, par simplification, pousse couramment à caractériser la voie de passage préférentielle des décapodes par une voie (potentielle) de marche en bordure d'écoulement. **Toutefois, dans certains cas de figures** (seuil en enrochements entre deux murs bajoyers verticaux, contraction d'écoulement entre deux murs bajoyers...), **il peut être envisageable que des voies de passage dans des zones plus profondes puissent exister, à condition toutefois que les vitesses en fond restent modérées. Au vu de l'état actuel des connaissances, l'existence, la caractérisation et le degré de franchissabilité de ces voies ne peuvent être définis que par expertise.**

Pente

Sur la base notamment des résultats issus d'expérimentations menées sur des équipements pilotes (Voegtli *et al.*, 2002 ; Lagarde *et al.*, 2016), il a été considéré que la pente de la voie de marche constituait le principal critère à prendre en compte pour caractériser la franchissabilité potentielle d'un obstacle.

Comme l'anguille, pour les pentes les plus faibles (inférieures ou égales à 20-30 %), le crustacé n'a à vaincre qu'une faible fraction de son poids lorsqu'il se déplace (Figure 76 et Tableau 23 pages 140 et 141).

Avec l'augmentation de la pente, les crustacés auront de plus en plus d'efforts à fournir pour progresser (Hamano *et al.*, 1995 ; Fièvet, 1999b). À partir de pentes de 100-175 % (45°-60°), 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.

Dans ces conditions, les plus petits individus seront favorisés.

N.B. L'évaluation de la franchissabilité par marche devra prendre en compte la plus forte pente entre la pente longitudinale et le dévers latéral de la voie de franchissement (Figure 75e page 139).

Distance à franchir

De façon pragmatique, et en l'état actuel des connaissances, il a été considéré comme pour le cas de l'anguille et des *Gobiidae*, que plus la distance à franchir est importante plus la probabilité pour les macro-crustacés de rencontrer des conditions de vitesses excessives, des charges inadaptées, des ruptures de pente incompatibles avec leurs capacités de marche augmente. De plus, l'individu se fatiguera d'autant plus vite que la pente sera importante.

Pour chaque sous-groupe, 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 marche potentielle, la longueur à franchir et la pente du parement.

Si la voie de marche est hétérogène (différentes pentes), les différentes parties devront être distinguées et analysées séparément.

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Les tableaux 30 et 31 présentent les classes de franchissabilité en fonction de la pente et de la distance à franchir.

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 80 page 156), présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité d'un ouvrage donné.

Tableau 30

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de marche pour le sous-groupe 5a (Grapsidae et Palaemonidae adultes et subadultes) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

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 ≤ 75	1	1	1	1	1	0,66	0,66
75 < P ≤ 150	1	1	1	1	0,66	0,66	0,33
150 < P ≤ 300	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
300 < P ≤ 600	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33
600 < P ≤ ∞	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0

Tableau 31

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de marche pour le sous-groupe 5b (Atyidae, Xiphocarididae ainsi que les juvéniles de Grapsidae et Palaemonidae) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

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 ≤ 75	1	1	1	1	1	1	1
75 < P ≤ 150	1	1	1	1	1	1	1
150 < P ≤ 300	1	1	1	1	1	1	1
300 < P ≤ 600	1	1	1	1	1	1	1
600 < P ≤ ∞	1	1	1	1	1	0,66	0,66



■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité d'un ouvrage par la marche pour les macro-crustacés (sous-groupes 5a et 5b) sont décrites ci-après.

1. Existence d'une voie de passage par marche

S'il existe une (ou plusieurs) voie(s) continue(s) à faible tirant d'eau (< 1 cm environ), alors effectuer un profil en long au niveau de cette (ces) voie(s) de passage potentielle(s) (ou uniquement de la voie potentielle qui paraît la plus favorable) et aller en 2.

Sinon, aller directement en 3.

S'il n'est pas possible d'identifier une voie de passage, il peut être intéressant d'apprécier la franchissabilité pour des conditions hydrologiques plus favorables pouvant se traduire par l'apparition d'une voie de marche. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse (aller en 2), il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site à des débits différents.

2. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par les voies de marche

Au préalable, définir la classe de franchissabilité ICE à partir de la longueur totale cumulée et de la pente moyenne de la voie de passage, en utilisant les tableaux 30 et 31 page 154.

Puis, si la voie de marche a été décomposée en plusieurs parties, déterminer la classe de franchissabilité ICE de chaque partie en utilisant également les tableaux 30 et 31. Si une ou plusieurs parties présente(nt) une classe de franchissabilité plus faible que la classe obtenue lors de l'analyse globale de la voie, alors retenir la classe de la partie la plus déclassante.

S'il existe plusieurs voies de passage potentielles, faire le même exercice pour chaque voie et retenir, à l'échelle de l'ouvrage, la classe de franchissabilité ICE de la voie la moins déclassante.

Puis aller en 3.

3. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par d'autres voies potentielles (en cas d'absence ou en complément de voie(s) de marche existante(s) à faible tirant d'eau)

Existe-t-il, par expertise, d'autres voies potentielles de passage dans des zones plus profondes ?

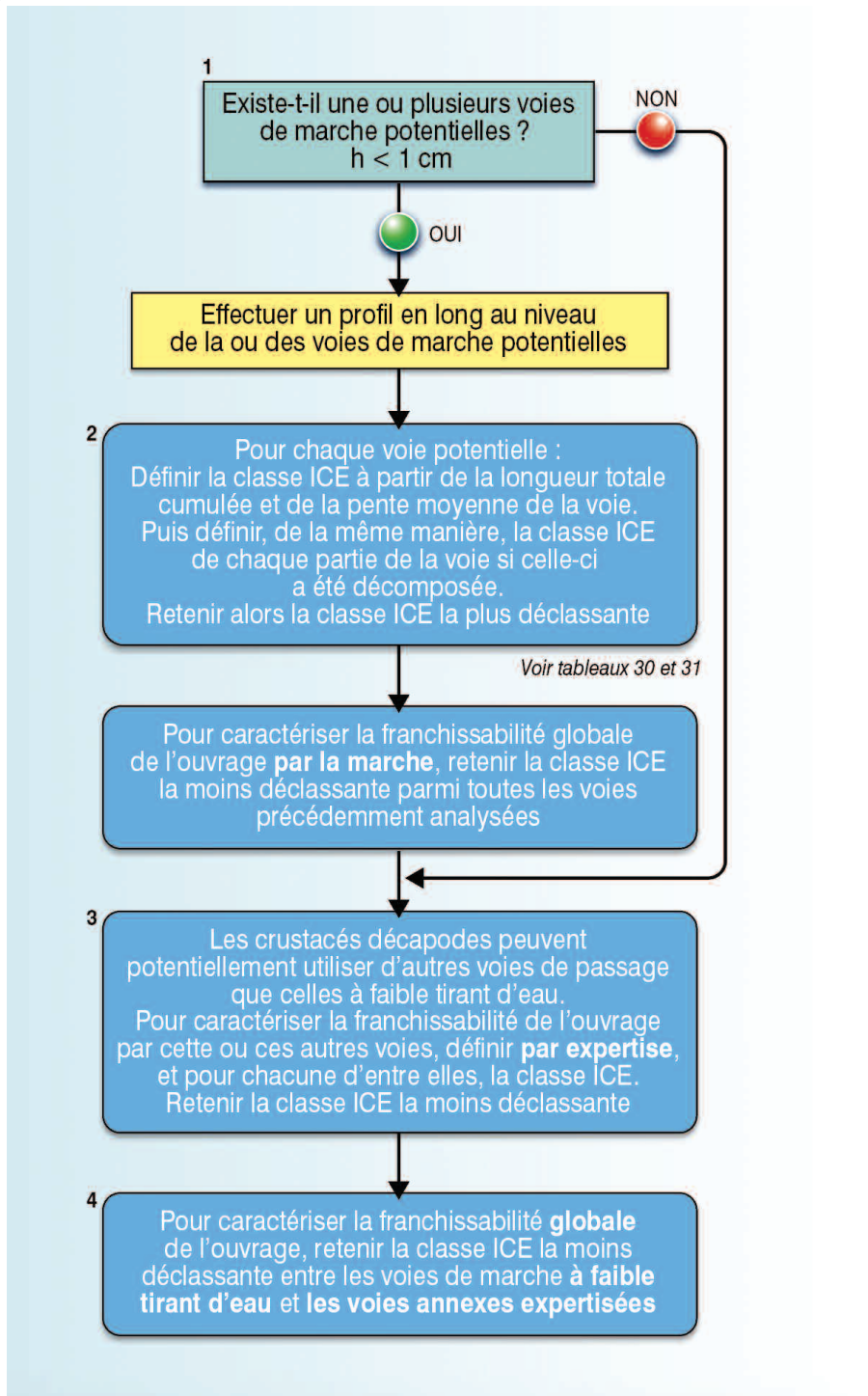
Si oui, définir par expertise la classe de franchissabilité éventuelle de ces autres voies et retenir celle de la voie la moins déclassante.

Aller en 4.

4. Détermination de la franchissabilité globale de l'ouvrage

Retenir à l'échelle de l'ouvrage la classe de franchissabilité ICE la moins déclassante entre celle obtenue pour le franchissement par la marche à faible tirant d'eau (à l'issue du point 2) et celle éventuellement obtenue par expertise d'autres voies de passage potentielles (à l'issue du point 3).

Figure 80



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour le franchissement par la marche chez les macro-crustacés.



Références

An underwater scene with a teal background. A large shark is swimming towards the right, leaving a trail of white water. A dark eel is swimming towards the left. In the bottom left corner, a crab is visible. The word 'Références' is written in white in the top left corner.

158 ■ Principaux sigles et abréviations

161 ■ Bibliographie

168 ■ Table des illustrations

172 ■ Liste des tableaux

174 ■ Remerciements



■ **a, b, c** : hauteur (**a**), longueur (**b**) et diagonale (**c**) d'un redan (exprimées en m). La valeur de **c** est égale à $\sqrt{a^2+b^2}$. Les valeurs **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 Lp.

c_{max} : Valeur de diagonale maximale d'un redan tolérée pour qu'il puisse être franchissable. Cette valeur doit être inférieure à 0,7 Lp.

■ **α** : angle d'incidence du jet, 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 (exprimée en m), qui correspond à la différence entre les niveaux d'eau amont (**Z_{amont}**) et aval (**Z_{aval}**) de la chute.

DH_{max} : correspond à une hauteur de chute théorique maximale franchissable associée à des poissons de longueur **Lp_{max}**.

DH_{mim} : correspond à une hauteur de chute théorique maximale franchissable associée à des poissons de longueur **Lp_{min}**.

DH_{moy} : correspond à une hauteur de chute théorique maximale franchissable associée à des poissons de longueur **Lp_{moy}**.

DH_{extrême} : correspond (pour les seuils verticaux, seuils à parement incliné ou passages en sousverse) à une hauteur de chute totalement infranchissable pour une espèce ou un groupe d'espèces donné(e) 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_{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. Cette valeur est fonction de la morphologie et de la taille des individus. Dans le cadre de la méthode, une valeur de **h_{min}** est proposée par espèce ou groupe d'espèces. Elle correspond globalement à 1,5 fois la hauteur moyenne de corps (**hp_{moy}**) de l'espèce ou groupe d'espèces considéré(e). Cette valeur est utilisée notamment dans le diagnostic de franchissabilité 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 et assurer un écoulement cohérent sur des seuils en enrochements. Cette valeur est



fonction de la morphologie des individus et de la pente du coursier. Dans le cadre de la méthode, une valeur de **h_{\min} enroch** est proposée par espèce ou groupe d'espèces. Cette valeur est utilisée notamment dans le diagnostic de franchissabilité des seuils en enrochements.

- **hp** : hauteur du corps des poissons (en m). Cette valeur est fonction de la morphologie des individus et correspond à un facteur de forme (**k**) multiplié par la longueur du poisson.

hp_{min} : hauteur de corps minimale d'une espèce ou d'un stade donné. Cette hauteur correspond à un individu de longueur **Lp_{min}**.

hp_{max} : hauteur maximale d'une espèce ou d'un stade donnée. Cette hauteur correspond à un individu de longueur **Lp_{max}**.

hp_{moy} : hauteur correspondant à la moyenne entre hp_{min} et hp_{max}. Cette hauteur correspond à un individu de longueur **Lp_{moy}**.

- **H** : charge d'eau sur un déversoir, une échancrure ou une vanne (exprimée en m).

H_{amont} : 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 présentant des écoulements dénoyés par l'aval.

H_{min} : charge minimale extrême sur un obstacle pour permettre le passage d'une espèce. Cette charge correspondant à **Z_{amont} - Z_{seuil}** est fonction de la morphologie et la taille des individus. Une valeur de **H_{min}** est proposée pour chacune des espèces ou groupe d'espèces sauteuses. Ce critère est notamment utilisé dans le diagnostic de franchissabilité d'une chute verticale.

- **Hf** : profondeur d'eau de la fosse en pied d'un obstacle (exprimée en m).

Hf_{min} : profondeur de fosse minimale 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 franchissabilité d'une chute verticale ou quasi-verticale ou pour le diagnostic de franchissabilité des seuils à parement incliné.

- **k** : facteur de forme d'un poisson (adimensionnel). Cette valeur est fonction de la morphologie des individus. Il correspond à la hauteur du poisson (**hp**) divisée par sa longueur (**Lp**).

- **L** : longueur d'un ouvrage à franchir (exprimée en m). Ce critère est utilisé pour le diagnostic de franchissabilité de passages routiers ou ferroviaires ou dans le cas d'un diagnostic spécifique pour l'anguille lorsque l'ouvrage présente une voie de reptation.

Lp : longueur totale d'un poisson (exprimée en m).

Lp_{min} : longueur (taille) minimale d'une espèce ou d'un stade biologique du groupe considéré dans le cadre de la méthode ICE.

Lp_{max} : longueur (taille) maximale d'une espèce ou d'un stade biologique du groupe considéré dans le cadre de la méthode ICE.

Lp_{moy} : longueur (taille) correspondant à la moyenne entre **Lp_{min}** et **Lp_{max}** d'une espèce ou d'un stade biologique du groupe considéré dans le cadre de la méthode ICE.

- **n** : coefficient de Manning (adimensionnel). Ce coefficient est représentatif de la rugosité du fond et des berges.

- **OV** : ouverture d'un organe mobile (exprimée en m).

OV_{min} : ouverture minimale extrême d'un organe mobile, nécessaire pour assurer le passage de l'espèce piscicole considérée. Dans le cadre de la méthode, une valeur de **H_{min}** est proposée par espèces ou groupe d'espèces. Cette valeur est utilisée dans le diagnostic de franchissabilité des organes mobiles (écoulement en sousverse).

- **P_{aer}** : puissance musculaire maximale (exprimée en watts) correspondant à la glycolyse aérobie. Elle est proportionnelle à la vitesse limite (supérieure) de croisière **U_{cr}** avant le passage en anaérobie.
- **P_{ana}** : puissance musculaire maximale (exprimée en watts) correspondant à la glycolyse anaérobie. Elle est proportionnelle à la vitesse maximale **U_{max}**.
- **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, exprimé en s) pendant lequel le poisson peut nager à une vitesse **U**. L'endurance d'un poisson **t_{Umax}** à sa vitesse de sprint **U_{max}** est généralement comprise entre 10 et 20 secondes.
- **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 (exprimée en m) d'un poisson, calculée à partir de sa vitesse de sprint **U_{max}** et de l'angle d'incidence **β** du saut.
- **Y_{max}** : hauteur de saut théorique (exprimée en m) d'un poisson, calculée à partir de sa vitesse de sprint **U_{max}** et de l'angle d'incidence **β** du saut. En pratique, pour le diagnostic ICE, on rajoute une partie de la longueur du poisson à cette valeur théorique.
- **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).





Bibliographie

- Aboussouan A. (1969). Note sur les « bichiques » de l'île de La Réunion. Revue des Travaux de la Station Marine d'Endoume 9: 25-31.
- Antea, Ocea Consult', Hydrétudes, Ecogea (2011). Évaluation de la continuité écologique des 13 rivières pérennes de la réunion. Rapports pour la DEAL Service Eau et Biodiversité.
- Arda (2012). Observation des Flux Migratoires de poissons et de macro-crustacés diadromes de la Réunion. Rapport Final. Soutien FEDER, Région Réunion et DEAL Réunion.
- Balon E.K., Bruton M.N. (1994). Fishes of the Tatinga River, Comoros, with comments on freshwater amphidromy in the goby *Sicyopterus lagocephalus*. Ichthyological Exploration of Freshwaters 5: 25-40.
- Baudoin J.M., Burgun V., Chanseau M., Larinier M., Ovidio M., Sremski W., Steinbach P., Voegtli B. (2014). Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. Onema. 200 pages.
- Bauer R.T. (2011). Amphidromy and migrations of freshwater shrimps. II. Delivery of hatching larvae to the sea, return juvenile upstream migration, and human impacts. New Frontiers in Crustacean Biology: 157-168.
- Bauer R.T. (2013). Amphidromy in shrimps: a life cycle between rivers and the sea. Latin American Journal of Aquatic Research 41: 633-650.
- Bauer R.T., Delahoussaye J. (2008). Life History Migrations of the Amphidromous River Shrimp *Macrobrachium ohione* from a Continental Large River System. Journal of Crustacean Biology 28: 622-632.
- 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, Fisheries Research Technical Report 78, 45p.
- Bell K. (1997). Complex recruitment dynamics with Doppler-like effects caused by shifts and cycles in age-at-recruitment. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 54: 1668-1681.
- Bell K. (1999). An overview of goby-fry fisheries. Naga, the ICLARM quarterly 22: 30-36.
- Bell K. (2009). What Comes Down Must Go Up : The Migration Cycle of Juvenile-Return Anadromous Taxa. American Fisheries Society Symposium 69: 321-341.
- Bell K., Brown J.A. (1995). Active salinity choice and enhanced swimming endurance in 0 to 8-d-old larvae of diadromous gobies, including *Sicydium punctatum* (Pisces), in Dominica, West Indies. Marine Biology 121: 409-417.
- Bell M.C., (1986). Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Fish. Eng. Res. Prog., U.S. Army Corps of Eng., North Pacific Div., Portland, Oregon, 290 p.
- Bell M.C., Delacy A.C. (1972). A compendium on the survival of fish passing through spillways and conduits. Fish. Eng. Prog., U.S. Army Corps of Eng., North Pacific Div., Portland, Oregon, 121p.
- Blanco J.F., Scatena F.N. (2007). The spatial arrangement of *neritina virginea* (*gastropoda: neritidae*) during upstream migration in a split-channel reach. River Research and Applications 23: 235-245.
- Blaxter J.H.S., Dixon W. (1959). Observations on the swimming speeds of fish. Journal du Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer 24(3) : 472-479.
- Blob R.W., Rai R., Julius M.L., Schoenfuss H.L. (2006). Functional diversity in extreme environments: effects of locomotor style and substrate texture on the waterfall-climbing performance of Hawaiian gobiid fishes. Journal of Zoology 268: 315-324.
- Burgun V., Chanseau M., Kreutzenberger K., Marty V., Pénil C., Tual M., Voegtli B. (2015). ICE. Informations sur la continuité écologique. Protocole de terrain pour l'acquisition des données. Onema. Collection Guides et Protocoles, 84p.



- Castro-Santos T. (2006). Modeling the effect of varying swim speeds on fish passage through velocity barriers. *Transactions of the American Fisheries Society* 135: 1230-1237.
- Chanseau M., Croze O., Larinier M. (1999). Impact des aménagements sur la migration anadrome du saumon atlantique (*Salmo salar* L.) sur le gave de Pau (France). *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*: 211-237.
- 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.
- 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.
- Courret D., Larinier M. (2008). Guide pour la conception de prises d'eau « ichtyocompatibles » pour les petites centrales hydroélectriques. Rapport ADEME - GHAAPPE. 60p +annexes.
- Covich A.P., Crowl T.A., Hein C.L., Townsend M.J., McDowell W.H. (2009). Predator-prey interactions in river networks: Comparing shrimp spatial refugia in two drainage basins. *Freshwater Biology* 54: 450-465.
- Cruz (1987). Reproductive biology and feeding habits of Cuyamel, *Joturus pichardi*, and Tepemachín, *Agonostomus monticola* (Pisces; *Mugilidae*) from Río Plátano, Mosquitia, Honduras. *Bulletin of Marine Science* 40: 63-72.
- Delacroix P., Champeau A. (1992). Ponte en eau douce de *Sicyopterus lagocephalus* (Pallas) poisson *Gobiidae* amphibionte des rivières de la Réunion. *Hydroécologie Appliquée* 1: 49-63.
- DCE (2000). Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.
- DWA, (2006). Funktionskontrolle von Fischaufstiegsanlagen [Monitoring of effectiveness of fish upstream migration facilities], DWA-Themen, p. 35, 41, 42, 45, 112-118.
- Egis Environnement - Hydrosphère (2007-2008). Étude de l'impact des modifications des conditions d'éclairage des cours d'eau franchis par des infrastructures de transport sur la circulation piscicole. Rapport pour le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables. Rapports phase 1 et 2.
- Ellien C., Werner U., Keith P. (2014). Morphological changes during the transition from freshwater to sea water in an amphidromous goby, *Sicyopterus lagocephalus* (Pallas 1770) (*Teleostei*). *Ecology of Freshwater Fish* 25: 48-59.
- European Environment Agency (2011). Landscape fragmentation in Europe; Joint EEA-FOEN report, 87 p. ISBN: 978-92-9213-215-6.
- FAO and DVWK (2002). Fish Passes - Design, Dimensions and Monitoring (English version of DVWK, 1996).
- Fahlbusch F.E. (1994). Scour in Rock Riverbeds Downstream of Large Dams. *Hydropower & Dams* 1(4): 30-32.
- Feutry P., Castelin M., Grondin H., Cruaud C., Couloux A., Keith P. (2012a). First record of *Kuhlia sauvagii* Regan, 1913 (Perciformes) in Mayotte and Réunion islands, Western Indian Ocean. *Cybiurn* 1913: 493-494.
- Feutry P., Castelin M., Ovenden J.R., Dettai A., Robinet T., Cruaud C., Keith P. (2013). Evolution of diadromy in fish: insights from a tropical genus (*Kuhlia* species). *The American naturalist* 181: 52-63.
- Feutry P., Tabouret H., Maeda K., Pécheyran C., Keith P. (2012b). Diadromous life cycle and behavioural plasticity in freshwater and estuarine *Kuhliidae* species (*Teleostei*) revealed by otolith microchemistry. *Aquatic Biology* 15: 195-204.
- Feutry P., Valade P., Ovenden J.R., Lopez P.J., Keith P. (2012c). Pelagic larval duration of two diadromous species of *Kuhliidae* (*Teleostei: Percoidae*) from Indo-Pacific insular systems. *Marine and Freshwater Research* 63: 397-402.
- Fièvet E. (1998). Distribution et capacités d'expansion des crevettes d'eau douce de la région Caraïbe : exemple des genres *Macrobrachium* et *Atya* (*Crustacea: Caridea*). *Biogeographica* 74: 1-22.
- Fièvet E., Bonnet-Arnaud P., Menard C., Tachet H. (1998). Étude de la migration amont des crevettes d'eau douce au niveau des obstacles artificiels, implications pour les dispositifs de franchissement. Rapport DIREN Guadeloupe, Parc National de la Guadeloupe et ESA CNRS 5023 Université Lyon 1. Convention d'étude.
- Fièvet E., Le Guennec B. (1998). Migration de masse de *Sicydium* spp. (*Gobiidae*) dans les rivières de Guadeloupe : implications pour le schéma hydraulique des mini centrales hydroélectriques "au fil de l'eau." *Cybiurn* 22: 293-296.
- Fièvet E. (1999a). Daylight Migration of Freshwater Shrimp (*Decapoda: Caridea*) over a Weir during Water Release from the Impoundment. *Crustaceana* 72: 351-356.



- Fièvet E. (1999b). An experimental survey of freshwater shrimp upstream migration in an impounded stream of Guadeloupe Island, Lesser Antilles. *Archiv für Hydrobiologie* 144: 339-355.
- Fièvet E. (2000). Passage facilities for diadromous freshwater shrimps (*Decapoda: Caridea*) in the Bananier River, Guadeloupe, West Indies. *Regulated Rivers: Research and Management* 16: 101-112.
- Fièvet E., Doledec S., Lim P. (2001). Distribution of migratory fishes and shrimps along multivariate gradients in tropical island streams. *Journal of Fish Biology* 59: 390-402.
- Fièvet E., Roux A., Redaud L., Sérandour J.M. (2000). Conception des dispositifs de franchissements pour la faune amphidrome (crevettes et poissons) des cours d'eau antillais : une revue. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 357/358: 241-256.
- 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.
- 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.
- Hamano T., Yoshimi K., Hayashi K.-I., Kakimoto H., Shokita S. (1995). Experiments on fishways for freshwater amphidromous shrimps. *Nippon Suisan Gakkaishi* 61: 171-178.
- Hoarau P. (2005). Dynamique structurale des populations de « bichiques » (*Sicyopterus lagocephalus*), Gobidés amphidromes des rivières de La Réunion. Thèse de doctorat, Université de La Réunion, 264 p.
- Hoarau P., Treilhes C., Valade P. (2018). Reproductive biology and recruitment in an amphidromous prawn *Macrobrachium australe* in Reunion Island. *Invertebrate Biology* 137(3): 231-239.
- Hogan A., Nicholson J. (1987). Sperm motility of sooty grunter, *Hephaestus fuliginosus* (Macleay), and jungle perch, *Kuhlia rupestris* (Lacépède), in different salinities. *Marine and Freshwater Research* 38 (4): 523-528.
- Hutchison M., Lee P., Norris A., Nixon D., Shorten D., Borchert T., Wang S., Chilcott K., Palmer P., Marsden T., Carton G., Kowitz L. (2016). Developing jungle perch fingerling production to improve fishing opportunities. Fisheries Research and Development Corporation, project n° 2012/2013.
- Keith P. (2003). Biology and ecology of amphidromous *Gobiidae* of the Indo-Pacific and the Caribbean regions. *Journal of Fish Biology* 63: 831-847.
- Keith P., Marquet G., Valade P., Bosc P., Vigneux E. (2006). Atlas des poissons et des crustacés d'eau douce des Comores, Mascareignes et Seychelles, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, collection Patrimoines Naturels: 65, 250 p.
- Keith P., Vigneux E., Bosc P. (1999). Atlas des poissons et des crustacés d'eau douce de la Réunion. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, collection Patrimoines Naturels: 39, 136 p.
- Lagarde R. (2016). Dynamiques de dévalaison des larves de *Sicydiinae* de la rivière Langevin - impact de l'aménagement hydroélectrique. Rapport Hydrô-Réunion, 36 p.
- Lagarde R. (2018). Phénologies, mécanismes et perturbations anthropiques des dynamiques de migration dulçaquicoles des espèces amphidromes : cas des *Sicydiinae* de La Réunion. Thèse de doctorat, Université de La Réunion, 300p.
- Lagarde R., Faivre L., Grondin H., Courret D. (2016). Etude des capacités de franchissement des poissons et macro-crustacés amphihalins de La Réunion. Rapport d'activité HydroRéunion 2015.
- Lagarde R., Teichert N., Boussarie G., Grondin H., Valade P. (2015). Upstream migration of amphidromous gobies of La Réunion Island: implication for management. *Fisheries Management and Ecology* 22: 437-449.
- Larinier M. (2002). Biological factors to be taken into account in the design of fishways, the concept of obstructions to upstream migration. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture Suppl.* 364: 28-38.
- Larinier M. (2008). Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia* 609: 97-108.
- Larinier M., Dartiguelongue J. (1989). La circulation des poissons migrateurs : le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*: 1-87.
- Larinier M., Porcher J.P., Travade F., Gosset C. (1994). Passe à poissons. Expertise. Conception des ouvrages de franchissement. Conseil Supérieur de la Pêche, Paris, collection Mise au point. 285 p. + annexes.
- 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., Courret D., Gomes P. (2006). Guide technique pour la conception des passes naturelles. GHAAPPE-CNR-AEAG. Rapport GHAAPPE RA.06.05-V1. 48 p. + annexes.



- 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. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture Suppl. 364: 135-146.
- Larinier M., Travade F. (2002). Downstream migration: problems and facilities. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture Suppl. 364: 181-207.
- Larinier M., Travade F. (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: 91-99. ISBN 978-3-939057-19-2.
- 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 Biomimetics 5, doi: 10.1088/1748-3182/5/3/035006.
- Legault A. (1986). Comportement d'escalade de l'anguille et colonisation 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. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 325: 83-91.
- LEMA (2006). LOI n°2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques. Page 53. Journal Officiel de la République Française.
- Lewis A.D., Hogan A.E. (1987). The enigmatic jungle perch - recent research provides some answers. SPC Fisheries Newsletter 40: 22-31.
- Lim P., Meunier J.-F., Keith P., Noël P.-Y. (2002). Atlas des poissons et des crustacés d'eau douce de la Martinique. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, collection Patrimoines Naturels: 51.
- Lucas M.C., Baras E. (2001). Migration of Freshwater Fishes. Oxford: Blackwell Science, 420 p.
- Maeda K., Yamasaki N., Kondo M., Tachihara K. (2008). Reproductive biology and early development of two species of sleeper, *Eleotris acanthopoma* and *Eleotris fusca* (Teleostei: Eleotridae). Pacific Science 62 (3): 327-340.
- Maeda K., Yamasaki N., Tachihara K. (2007). Size and age at recruitment and spawning season of sleeper, genus *Eleotris* (Teleostei: Eleotridae) on Okinawa Island, southern Japan. Raffles Bulletin of Zoology Suppl. 14: 199-207.
- March J.G., Benstead J.P., Pringle C.M., Scatena F.N. (2003). Damming tropical island streams: problems, solutions, and alternatives. BioScience 53: 1069.
- Marcy B.C., Fletcher D.E., Martin F.D., Paller M.H., Reichert M.J.M. (2005). Fishes of the Middle Savannah River basin: with emphasis on the Savannah River site. The University of Georgia Press, Athens, GA., 462 p.
- Marsden T. (2016). Developing jungle perch fingerling production to improve fishing opportunities. St Helens Creek Restocking Sampling. Australian Fish Passage Services for Department of Agriculture Fisheries and Forestry, Queensland, Australia, Rapport préparé par les Services des passes à poissons Australien (AFPS) pour le Département de l'Agriculture, des Pêches et de la Forêt (DAFF), 15 p.
- Mc Dowall R.M. (1988). Diadromy in Fishes : Migrations between Freshwater and Marine Environments. Croom Helm, London.
- Mc Dowall R.M. (2007). On amphidromy, a distinct form of diadromy in aquatic organisms. Fish and Fisheries 8: 1-13.
- Mc Dowall R.M. (2010). Why be amphidromous: Expatrial dispersal and the place of source and sink population dynamics? Reviews in Fish Biology and Fisheries 20: 87-100.
- Mc Leave (1980). Swimming performance of European eel elvers. Journal of Fish Biology 16: 445-452.
- 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.
- Mennesson M., Keith P. (2017). Evidence of two species currently under the name of *Eleotris fusca* (Gobioidae: Eleotridae) in the Indian Ocean. Cybium 41:213-220.
- Merrick, J. R., Schmida, G. E. (1984). Australian Freshwater Fishes: Biology and Management. Griffith Press Limited, South Australia.



- Monti D., Keith P., Vigneux E. (2010). Atlas des poissons et des crustacés d'eau douce de la Guadeloupe. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, collection Patrimoines Naturels: 69.
- Morandi B., Rivière-Honegger A., Cottet M. (2015). Étude en sciences humaines et sociales sur l'eau et les milieux aquatiques en Martinique. Les représentations et les pratiques associées aux cours d'eau. Étude n°043-12-2014. Rapport CNRS, CIRAD, ODE Martinique, ONEMA, 218 p. + annexes.
- Myers G.S. (1949). Usage of anadromous, catadromous and allied terms for migratory fishes. *Copeia* 1949: 89.
- Nordén, B., Appelqvist, T. (2001). Conceptual problems of ecological continuity and its bioindicator. *Biodiversity and Conservation* 10: 779-791.
- Ocea Consult' (2014a). Suivi des réseaux de contrôle de surveillance de la qualité des masses d'eau de surface de l'île de Mayotte - Volet Poissons et macro-crustacés. Programme de l'année 2014. Rapport de synthèse pour le compte du BRGM-Mayotte.
- Ocea Consult' (2014b). Accompagnement pour l'élaboration d'un projet d'arrêté de pêche en eau douce sur les cours d'eau de Mayotte. Rapport pour le compte de la DEAL 976. 60 p.
- Ocea Consult' (2014c). Suivi 2013 des éléments biologiques " poissons et macro-crustacés " des rivières du bassin Réunion. Rapport final pour le compte de l'Office de l'Eau de La Réunion, 232 p.
- Ocea et Antea (2013). Expertise écologique et hydrologique de l'impact de la prise EDF du Bras Patience - Réunion. Rapport pour le Groupement Hydraulique EDF, La Réunion. 12 pages
- 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., 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.
- Olivier J.-M., Mérigoux S., Forcellini M., Grondin H., Mathieu C., Péru N., Richarson M., Sagnes P., Usseglio-Polatera P., Valade P. (2012). Conception d'indices de bio-évaluation de la qualité écologique des rivières de l'île de La Réunion à partir des poissons et macro-crustacés et des invertébrés benthiques. Rapport final Univ Lyon I CNRS ENTPE - LEHNA, ARDA, Europe FEDER, Office de l'eau Réunion, 506 p.
- Olivier T.J. (2013). Amphidromous life History of the Caridean shrimp *Macrobrachium ohione* (Decapoda: Palaemonidae) from the Mississippi River system. Ph.D. dissertation, University of Louisiana, 169 p.
- Olivier T.J., Handy K.Q., Bauer R.T. (2013). Effects of river control structures on the juvenile migration of *Macrobrachium ohione*. *Freshwater Biology* 58: 1603-1613.
- Ovidio M., Phillipart J.-C. (2002). The impact of small physical obstacles on upstream movements of six species of fish. *Hydrobiologia* 483: 55-69.
- Phillip D.A.T. (1993). Reproduction and feeding of the mountain mullet, *Agonostomus monticola*, in Trinidad, West Indies. *Environmental Biology of Fishes* 37(1): 47-55.
- 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 Report, 120 p.
- Préfet de la Martinique (2014). Arrêté préfectoral n°2014307-0011 reconduisant l'arrêté N° 09-03540 du 25 septembre 2009 et l'arrêté N° 2013301-0020 du 28 octobre 2013 portant interdiction de la pêche et de la commercialisation des poissons et crustacés pêchés dans les rivières situées sur le territoire de la Martinique. Page 2.
- Préfet de La Réunion (2008a). Arrêté n°1742 du 15 juillet 2008 réglementant la pêche maritime professionnelle dans les eaux du département de La Réunion. Page 22.
- Préfet de La Réunion (2008b). Arrêté n°1743 du 15 juillet 2008 réglementant l'exercice de la pêche maritime de loisir dans les eaux du département de La Réunion. Page 12.
- Pusey B.J., Kennard M., Arthington A. (2004). *Freshwater Fishes of North-Eastern Australia*. CSIRO Publishing, 700 p.
- Pyron M., Covich A.P. (2003). Migration patterns, densities, and growth of *Neritina punctulata* snails in Rio Espiritu an Rio Mameyes, Northeastern Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science* 39: 338-347.
- Réveillac E. (2008). Histoires de vie larvaire et dispersion des *Anguillidae* : vers une approche bio-évolutive. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 232 p.
- Rice E., Kadavy K.C., Robinson K.M. (1998). Roughness of loose rock riprap on steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering* 124: 179-185.



- Robert M. (2015). Analyse des capacités de franchissement des espèces de poissons et de macro-crustacés des cours d'eau des DOM insulaires pour le diagnostic de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité écologique et le dimensionnement des ouvrages de franchissement. Rapport du Parc National de Guadeloupe pour l'Onema et l'Université des Antilles, 33p.
- Robinet T., Feunteun E. (2002). First observation of shortfinned *Anguilla bicolor bicolor* and longfinned *Anguilla marmorata* silver eels in the Reunion island. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 364: 87-95.
- Robinet T., Lecomte-Finiger R., Escoubeyrou K., Feunteun E. (2003). Tropical eels *Anguilla* spp. recruiting to Réunion Island in the Indian Ocean: taxonomy, patterns of recruitment and early life histories. Marine Ecology Progress Series 259: 263-272.
- Rose F (1974). The epiphytes of oak. In: Morris MG and Perring FH (eds) The British Oak. Its History and Natural History. EW Classey, Faringdon, pp 250-273.
- Ruggles C.P. (1980). A review of the downstream migration of atlantic salmon. Freshwater and Anadromous Div. Ressource Branch Dept. of Fisheries and Oceans, Halifax, Nova Scotia, Can. Tech. Rep. of Fisheries and Aquatic Sci. 953, 39p.
- Ruggles C.P., Murray D.G. (1983). A review of fish response to spillways . Freshwater and Anadromous Div. Ressource Branch Dept. of Fisheries and Oceans, Halifax, Nova Scotia, Can. Tech. Rep. of Fisheries and Aquatic Sci. 1172, 30p.
- Schoenfuss H.L., Blob R.W. (2003). Kinematics of waterfall climbing in Hawaiian freshwater fishes (*Gobiidae*): vertical propulsion at the aquatic-terrestrial interface. Journal of Zoology 261: 191-205.
- Schübel A. (1998). Pêcheurs de bichiques de La Réunion. Rapport final d'études en Sciences Sociales à l'Université de La Réunion, réalisé à IDEA Consultants, en partenariat avec l'ARDA, le CSP et la DIREN 974, 314p.
- Sethi S.N., Ram N., Venkatesan V. (2012). Length-weight relationship of *Macrobrachium lar* (Fabricius, 1798), an endemic freshwater prawn in streams and ponds of Andaman and Nicobar Islands. Indian Journal of Fisheries 59: 157-161.
- Sethi S.N., Ram N., Venkatesan V. (2014). Reproductive biology of *Macrobrachium lar* (fabricius, 1798) in Andaman Islands. Indian Journal of Marine Sciences 43: 1-8.
- Smith W.E., Kwak T.J. (2014a). A capture-recapture model of amphidromous fish dispersal. Journal of Fish Biology 84: 897-912.
- Smith W.E., Kwak T.J. (2014b). Otolith microchemistry of tropical diadromous fishes: spatial and migratory dynamics. Journal of Fish Biology 84: 913-28.
- Sörenson I. (1951). An investigation of some factors affecting the upstream migration of the eel. Institute of Freshwater Research, Drottningholm, Report 32: 126-132.
- Stuart T.A. (1962). The leaping behaviour of salmon and trout at falls and obstructions. Freshwater and Salmon Fisheries Research 28: 1-46.
- Sugeha H.Y., Aoyama J., Tsukamoto K. (2006). Downstream migration of tropical anguillid silver eels from lake Poso, Central Sulawesi, Indonesia. Limnotek 13(1): 18-25.
- Tabouret H. (2012). Les poissons migrateurs amphihalins des départements d'outre-mer : état des lieux. Partie 1 : synthèse générale sur les DOM insulaires. Rapport final ONEMA-MNHN, 276p.
- Tabouret H. (2013). Les poissons migrateurs amphihalins des départements d'outre-mer : état des lieux. Partie 2 : Quels outils de gestion ? Expérience internationale et propositions. Rapport final ONEMA-MNHN, 82p.
- Teichert N. (2012). Variabilité des traits d'histoire de vie chez les *Gobiidae* (*Sicydiinae*) amphidromes de l'île de la Réunion : *Sicyopterus lagocephalus* (Pallas, 1770) et *Cotylopus acutipinnis* (Guichenot, 1863). Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 342 p.
- Teichert N., Keith P., Valade P., Richarson M., Metzger M., Gaudin P. (2013). Breeding pattern and nest guarding in *Sicyopterus lagocephalus*, a widespread amphidromous *Gobiidae*. Journal of Ethology 31: 239-247.
- Teichert N., Valade P., Grondin H., Trichet E., Sardenne F., Gaudin P. (2016). Pelagic larval traits of the amphidromous goby *Sicyopterus lagocephalus* display seasonal variations related to temperature in La Réunion Island. Ecology of Freshwater Fish 25: 234-247.
- Thinus Z., Guillot F. (2016). Impact à la dévalaison de l'anguille des centrales hydroélectrique de grande capacité de l'aval de La Seine. Rapport de synthèse CEREMA Normandie Centre, 63p.



- Thorstad E.B., Fiske P., Aarestrup K., Hvidsten N.A., Harsaker K., Heggberget T.G., Okland F. (2005). Upstream migration of Atlantic salmon in three regulated rivers. In Spedicato M.T., Lembo G., Marmulla G. (eds) Aquatic telemetry: advances and applications. Proceedings of the Fifth Conference on Fish Telemetry held in Europe, Ustica, Italy, 9-13 June 2003, pp 111-121.
- Valade P., Lord C., Grondin H., Bosc P., Taillebois L., Lida M., Tsukamoto K., Keith P. (2009). Early life history and description of larval stages of an amphidromous goby, *Sicyopterus lagocephalus* (Gobioidae: Sicydiinae). *Cybium* 33: 309-319.
- Valade P., Roger E., Grondin H., Bosc P., Larinier M., et Voegtli B. (2004). Etude du franchissement des ouvrages de captage d'eau (Transfert Est-Ouest) par les larves de bouche-rondes (bichiques) lors de la dévalaison. Rapport ARDA-ONEMA-SIEE pour le compte du Département de La Réunion, 63p.
- 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. (2014). Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectrique lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique. Bassin du Gave d'Oloron. Rapport de synthèse pour la DDTM 64.
- 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. Rapport 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. Rapport DDTM 64 - Ecogea, 46 p. + annexes.
- Voegtli B., Larinier M. (2000). Etude sur les capacités de franchissement des civelles et anguillettes. Site hydroélectrique de Tuillères sur la Dordogne (24) et Barrage estuarien d'Arzal sur la Vilaine (56). Rapport Ghaappe RA00.05/ Migado G15-00-RT, 69p. + annexes.
- Voegtli B., Larinier M. (2008). Définition d'une stratégie de restauration de l'axe migration pour l'anguille. Cours d'eau du Gave de Pau. Rapport Midival-Ecogea-Ghaappe RA08.02, 42 p. + annexes.
- Voegtli B., Larinier M., Bosc P. (2002). Étude sur les capacités de franchissement des cabots bouche-rondes (*Sicyopterus lagocephalus*, Pallas, 1770) en vue de la conception de dispositifs adaptés aux prises d'eau du transfert Salazie (Ile de La Réunion). *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 364: 109-120.
- Wardle C.S. (1980). Effects of temperature on the maximum swimming speed of fishes. In *Environmental Physiology of Fishes*, Plenum Press, 723 p.: 519-531.
- Wouthuyzen S., Aoyama J., Sugeha H.Y., Miller M.J., Kuroki M., Minegishi Y., Suharti S.R., Tsukamoto K. (2009). Seasonality of spawning by tropical anguillid eels around Sulawesi Island, Indonesia. *Naturwissenschaften* 96: 153-158.
- Yamasaki N., Kondo M., Maeda K., Tachihara K. (2011). Reproductive biology of three amphidromous gobies, *Sicyopterus japonicus*, *Awaous melanocephalus*, and *Stenogobius sp.*, on Okinawa Island. *Cybium* 35: 345-359.
- Yasuda Y., Ohtsu I. (1999). Flow resistance of skimming flow in stepped channels. Proceedings of the 28th IAHR Congress, Graz, Austria, Session B14, 6 p.
- Zhou Y. (1982). The swimming speed of fish in towed gears, a reexamination of the principles. Department of Agriculture and Fisheries for Scotland, Working Paper No. 4, 55p.
- Zydlewski J., Wilkie M.P. (2012). Freshwater to Seawater Transitions in Migratory Fishes. *Fish Physiology* 32: 253-326.



Table des illustrations

- 14 **Figure 1.** Cycle migratoire d'un migrateur amphidrome (cas des Gobiidae). Modifié d'après Tabouret, 2012.
- 17 **Figure 2.** Cycle migratoire d'un migrateur amphihalal catadrome.
- 20 **Figure 3.** Exemples de chutes naturelles.
- 20 **Figure 4.** Exemples d'assecs à La Réunion, possiblement naturels, mais amplifiés par des prélèvements d'eau en amont.
- 23 **Figure 5.** Exemples de seuils ou barrages présents sur les cours d'eau des départements insulaires ultramarins.
- 23 **Figure 6.** Exemple d'un seuil constitué d'organes mobiles.
- 24 **Figure 7.** Exemples de passages à gué s'apparentant à des seuils.
- 25 **Figure 8.** Exemples de passages routiers.
- 26 **Figure 9.** Exemples d'aménagements pour pratiquer la pêche aux Gobiidae à La Réunion.
- 27 **Figure 10.** Exemples de passages à franchir au niveau de déversoirs ou de chutes naturelles.
- 29 **Figure 11.** Exemples de prises d'eau liées à différents usages.
- 30 **Figure 12.** Exemples de ralentissement des écoulements provoqué par certains ouvrages, pouvant impacter la dévalaison suite à une décantation des individus dévalants.
- 36 **Figure 13.** Schéma représentant le tirant d'eau minimum (h_{\min}) considéré comme nécessaire pour qu'un poisson puisse nager convenablement. Adapté de Baudoin *et al.*, 2014.
- 37 **Figure 14.** Juvéniles de mulets (*Agonostomus*) tentant de franchir par saut le passage à gué de la ravine chaude (Grande Rivière à Goyaves, Guadeloupe).
- 38 **Figure 15.** Trajectoires théoriques de saut pour un saumon de 0,8 m de longueur en fonction de la température de l'eau et de l'angle d'incidence avec l'horizontale au début du saut. D'après Larinier *et al.*, 2002 et modifié par Baudoin *et al.*, 2014.
- 39 **Figure 16.** Charge minimale (H_{\min}) sur un obstacle, permettant une bonne réception et la reprise d'une nage efficace suite à un franchissement par saut (h_{\min} représente le tirant d'eau minimum nécessaire pour la nage, présenté en Figure 13). D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 40 **Figure 17.** Exemples de fosses en aval d'ouvrages.
- 41 **Figure 18.** Ordre de grandeur de la profondeur minimum de fosse d'appel ($H_{f_{\min}}$) nécessaire pour permettre au poisson de franchir un obstacle (par saut ou par nage) dans des conditions satisfaisantes. D'après Baudoin *et al.*, 2014.



- 43 **Figure 19.** Anguilles en reptation.
- 43 **Figure 20.** Les capacités de ventousage des *Sicydiinae*.
- 44 **Figure 21.** Capacités de marche des macro-crustacés.
- 49 **Figure 22.** Exemples de localisation de profils en long à réaliser pour caractériser un ouvrage.
- 49 **Figure 23.** Exemple de profil en long réalisé sur un ouvrage simple. Modifié d'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 50 **Figure 24.** Exemples d'ouvrages à différentes conditions de débit.
- 54 **Figure 25.** Schéma type d'un aménagement hydroélectrique en dérivation et principe de la modélisation de ses impacts sur la survie d'organismes dévalant. D'après Voegtli et Larinier, 2004 et modifié par Baudoin *et al.*, 2014.
- 56 **Figure 26.** Espèces du premier groupe.
- 57 **Figure 27.** Espèces du deuxième groupe.
- 60 **Figure 28.** Les trois stades d'anguilles définissant le troisième groupe.
- 61 **Figure 29.** Espèces du quatrième groupe.
- 62 **Figure 30.** Espèces du cinquième groupe.
- 73 **Figure 31.** Différentes configurations d'obstacles de types « seuil » ou « barrage ».
- 76 **Figure 32.** Types de jets et conditions de franchissement par la nage au niveau d'un obstacle vertical ou quasi-vertical (pente > 150 %). D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 81 **Figure 33.** Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité piscicole ICE par nage ou saut au niveau d'un obstacle vertical ou quasi-vertical (pente > 150 %).
- 83 **Figure 34.** Évolution des conditions d'écoulement le long d'un coursier de seuil incliné. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 83 **Figure 35.** Extrait graphique d'une modélisation hydraulique effectuée sous HEC RAS. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 84 **Figure 36.** 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 1 000 l/s/m) pour une pente donnée (12 %, 25 % et 50 %) et une rugosité donnée du coursier (coefficient de Manning $n = 0,015$). D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 85 **Figure 37.** Relation entre la chute franchissable par la nage par un poisson, sa vitesse maximale de nage et son endurance (pente = 25 %, rugosité $n = 0,020$, débit unitaire $q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s/m}$). D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 86 **Figure 38.** Évolution des chutes franchissables par la nage par un poisson en fonction de sa vitesse maximale de nage (U_{max}) et de son endurance (t), pour un coursier donné (pente 25 %, rugosité $n = 0,020$). Les trois abaques correspondent à 3 débits unitaires différents ($q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s/m}$, $q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s/m}$ et $q = 1,0 \text{ m}^3/\text{s/m}$). D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 87 **Figure 39.** Évolution des chutes franchissables par la nage par un poisson en fonction de sa vitesse maximale de nage (U_{max}) et de son endurance (t), pour un débit unitaire donné ($q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s/m}$). Les trois abaques correspondent à des coursiers de différentes pentes (12 %, 25 % et 50 %) présentant une rugosité constante ($n = 0,020$). D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 88 **Figure 40.** Évolution des chutes franchissables par la nage par un poisson en fonction de sa vitesse maximale de nage (U_{max}) et de son endurance (t), pour un débit unitaire donné ($q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s/m}$) et un coursier de pente constante (12 %). Les trois abaques correspondent à des coursiers de rugosités variables ($n = 0,010$, $n = 0,020$ et $n = 0,030$). D'après Baudoin *et al.*, 2014.

- 89 **Figure 41.** Évolution des chutes franchissables en fonction de la vitesse maximale de nage du poisson (U_{max}) en considérant une endurance comprise entre 10 et 20 s, quels que soient les autres paramètres (pente du coursier, rugosité du coursier, débit unitaire). D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 90 **Figure 42.** Exemples de redans au niveau de seuils inclinés.
- 91 **Figure 43.** Écoulement en nappes plongeantes (ressauts) et écoulement de surface au niveau de seuils présentant des redans. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 91 **Figure 44.** Transition entre un écoulement avec ressaut et un écoulement de surface en fonction du débit unitaire et des caractéristiques du redan. D'après Yasuda et Ohtsu (1999) et modifié par Baudoin *et al.*, 2014.
- 92 **Figure 45.** Conditions nécessaires pour qu'un redan soit franchissable. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 92 **Figure 46.** Schéma de principe d'un seuil incliné avec chute aval. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 93 **Figure 47.** Écoulement sur un parement incliné présentant une chute aval.
- 97 **Figure 48.** Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité piscicole ICE par nage ou saut au niveau d'un seuil à parement incliné (pente ≤ 150 %).
- 98 **Figure 49.** Exemples de seuils en enrochements dans les départements insulaires d'outre-mer.
- 99 **Figure 50.** Exemple de profils de vitesses sur une rampe en enrochements jointifs ($D_{65} = 0,85$ m) présentant une pente de 10 %. D'après Larinier *et al.* (2006).
- 100 **Figure 51.** Qualité d'écoulements entre enrochements.
- 103 **Figure 52.** Seuil en enrochements avec redan.
- 109 **Figure 53.** Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité piscicole ICE par nage au niveau d'un seuil en enrochements.
- 110 **Figure 54.** Écoulements au-dessus d'organes mobiles.
- 111 **Figure 55.** Schémas de vannes en charge et non en charge. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 111 **Figure 56.** Paramètres permettant de caractériser un écoulement sous vanne en régime dénoyé. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 112 **Figure 57.** Paramètres permettant de caractériser un écoulement sous vanne en régime noyé. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 116 **Figure 58.** Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité piscicole ICE d'écoulements sous organes mobiles ou par des orifices de fond.
- 117 **Figure 59.** Exemples de différents types d'ouvrages. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 118 **Figure 60.** Exemples de fortes vitesses au niveau de passages busés.
- 118 **Figure 61.** Exemple de faibles tirants d'eau au niveau d'un radier sous un pont routier.
- 119 **Figure 62.** Exemples de chutes en aval d'ouvrages routiers.
- 119 **Figure 63.** Exemple de mise en vitesses en amont d'un passage busé.
- 120 **Figure 64.** Exemples de problèmes pouvant survenir suite à un mauvais calage longitudinal d'un ouvrage de franchissement routier ou ferroviaire.
- 120 **Figure 65.** Exemples d'ouvrages fortement comblés en amont par des embâcles.
- 121 **Figure 66.** Exemples d'ouvrages induisant un changement de luminosité plus ou moins progressif voire brusque.
- 123 **Figure 67.** Évolution de la distance parcourue en fonction de la vitesse de l'écoulement pour les groupes d'espèces n°1 et 2.



- 124 **Figure 68.** Évolution de la distance parcourue en fonction de la vitesse de l'écoulement pour les groupes d'espèces n°3 et 4.
- 125 **Figure 69.** Schéma de principe d'un ouvrage routier présentant une chute aval. D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 127 **Figure 70.** Diverses configurations d'écoulement dans les buses et méthodologies employées pour estimer leur franchissabilité par la nage.
- 133 **Figure 71.** Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité piscicole ICE au niveau d'un ouvrage routier ou d'un passage busé.
- 135 **Figure 72.** Exemples d'ouvrages complexes pouvant être décomposés en une succession d'ouvrages « simples ».
- 135 **Figure 73.** Exemple d'ouvrage complexe ne pouvant pas être décomposé en plusieurs ouvrages « simples ».
- 138 **Figure 74.** Exemples de chutes naturelles créant des zones potentielles de repos (anfractuosités) et assurant une certaine franchissabilité pour les civelles.
- 139 **Figure 75.** Exemples de voies de reptation potentielles à analyser pour l'anguille (matérialisées par les tirets rouges). Ces voies sont également des voies potentielles de ventousage pour les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques et des voies de marche pour les macro-crustacés.
- 140 **Figure 76.** Décomposition du poids d'une anguille en deux composantes : une composante favorable au maintien du poisson contre la paroi (en jaune) et une composante défavorable (en rouge). D'après Baudoin *et al.*, 2014.
- 142 **Figure 77.** Anguille européenne : civelle et anguille (*A. anguilla*), et Anguille du Mozambique (*A. mossambica*).
- 145 **Figure 78.** Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour le franchissement par reptation chez les anguilles.
- 151 **Figure 79.** Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour le franchissement par la marche chez les macro-crustacés.
- 156 **Figure 80.** Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour le franchissement par ventousage et escalade chez les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques.



Liste des tableaux

- 15 **Tableau 1.** Liste des poissons amphidromes des différents Drom insulaires et caractéristiques des stades migratoires
- 16 **Tableau 2.** Liste des crustacés décapodes amphidromes des différents Drom insulaires et caractéristiques des stades migratoires
- 17 **Tableau 3.** Liste des poissons catadromes des différents Drom insulaires et caractéristiques des stades migratoires
- 18 **Tableau 4.** Liste des poissons vicariants et sporadiques des différents Drom insulaires et caractéristiques des stades migratoires
- 35 **Tableau 5.** Critères de taille retenus pour les différentes espèces considérées
- 38 **Tableau 6.** Évolution théorique de la hauteur de saut d'un poisson d'une longueur donnée et de sa vitesse initiale U_{\max} 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
- 64-65 **Tableau 7. et 7bis.** Liste des espèces considérées dans le cadre de la présente méthode, territoire concerné, modes de franchissement, tailles et groupes ICE associés
- 66 **Tableau 8.** Tableau récapitulatif des groupes d'espèces ICE et des modes de franchissement associés
- 67 **Tableau 9.** Tableau récapitulatif des différents groupes d'espèces de poissons considérés dans le cadre de la présente méthode, et de leurs capacités de nage et de saut théoriques
- 77 **Tableau 10.** Ordre de grandeur de la profondeur minimale de fosse ($H_{f_{\min}}$) nécessaire pour permettre au poisson de franchir un obstacle à parement vertical ($> 150 \%$), en fonction de la hauteur de chute (DH). D'après Baudoin *et al.*, 2014
- 78 **Tableau 11.** Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité piscicole, par nage ou saut, de seuils verticaux ou quasi verticaux (pente $> 150 \%$)
- 93 **Tableau 12.** Détermination de la classe de franchissabilité ICE globale d'un ouvrage combinant un seuil à parement incliné et une chute aval. D'après Baudoin *et al.*, 2014
- 93 **Tableau 13.** Ordre de grandeur de la profondeur de fosse minimale ($H_{f_{\min}}$) nécessaire pour permettre au poisson de franchir par la nage un obstacle à parement incliné (pente $\leq 150 \%$)
- 94 **Tableau 14.** Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité de seuils à parement incliné (pente $\leq 150 \%$)



- 101 **Tableau 15.** Tirant d'eau minimal ($h_{\min \text{ enroch}}$) permettant le franchissement des seuils en enrochements par la nage, en fonction de la pente moyenne du seuil. Modifié d'après Baudoin *et al.*, 2014
- 104 **Tableau 16.** Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité des seuils en enrochements (pour des pentes moyennes de seuil $\leq 9\%$)
- 106 **Tableau 17.** Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité des seuils en enrochements (pour des pentes moyennes de seuil $> 9\%$)
- 114 **Tableau 18.** Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité d'écoulements sous organes mobiles ou par des orifices de fond
- 126 **Tableau 19.** Détermination de la classe de franchissabilité ICE globale d'un ouvrage de franchissement routier présentant une chute aval. D'après Baudoin *et al.*, 2014
- 128 **Tableau 20.** Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité des ouvrages routiers ou passages busés par la nage, en fonction de leur pente et de leur longueur
- 130 **Tableau 21.** Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité des ouvrages routiers ou passages busés par la nage en fonction de leur longueur et des vitesses d'écoulement dans l'ouvrage
- 136 **Tableau 22.** Détermination de la classe de franchissabilité ICE globale d'un ouvrage complexe constitué par une série de 2 ouvrages « simples »
- 141 **Tableau 23.** Ordre de grandeur des paramètres favorables ($\cos 'a'$) et défavorable ($\sin 'a'$) au franchissement par reptation de l'anguille, en fonction de la pente de l'obstacle. D'après Baudoin *et al.*, 2014
- 143 **Tableau 24.** Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une zone de reptation pour le sous-groupe 3a (anguilles de longueur > 500 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage
- 143 **Tableau 25.** Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une zone de reptation pour le sous-groupe 3b (anguilles de longueur comprise entre 100 et 500 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage
- 143 **Tableau 26.** Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une zone de reptation pour le sous-groupe 3c (civelles de longueur < 100 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage
- 149 **Tableau 27.** Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie d'escalade pour le sous-groupe 1b (post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques, c'est-à-dire *Eleotridae* et *Gobiidae* hors *Sicydiinae*) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage
- 149 **Tableau 28.** Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de ventousage pour le sous-groupe 4a (sub-adultes et adultes de *Gobiidae Sicydiinae*) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage
- 149 **Tableau 29.** Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de ventousage pour le sous-groupe 4b (post-larves et juvéniles de *Gobiidae Sicydiinae*) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage
- 154 **Tableau 30.** Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de marche pour le sous-groupe 5a (*Grapsidae* et *Palaemonidae* adultes et subadultes) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage
- 154 **Tableau 31.** Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de marche pour le sous-groupe 5b (*Atyidae*, *Xiphocarididae* ainsi que les juvéniles de *Grapsidae* et *Palaemonidae*) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage



Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement l'ensemble des contributeurs et des membres des instances de travail, ainsi que leurs organismes, qui ont permis de compléter, améliorer et illustrer cette publication par leurs relectures, leurs connaissances et observations de terrain, notamment :

- Anil Akbaraly (Conseil départemental de Mayotte)
- François Ghione (Deal de Mayotte)
- Jean-Pierre Gout (Deal de la Martinique)
- Julie Gresser (Office de l'eau de la Martinique)
- Raphaël Lagarde (Hydrô Réunion)
- Joël Li-Tsoe (Deal de la Guadeloupe)
- Pierre Minou (Arda)
- Dominique Monti (Université des Antilles)
- Alexandre Moullama (Office de l'eau de La Réunion)
- Isabelle Nasso (Office de l'eau de la Guadeloupe)
- Fabian Rateau (Office de l'eau de la Martinique)
- Alain Reuge (Deal de la Guadeloupe)
- Marie Robert (Parc national de la Guadeloupe)
- Sabine Staal (Deal de La Réunion)
- Loïc Thouvignon (Agence française pour la biodiversité, Service départemental de Mayotte)

Également, les concepts instruits dans cette publication reposent sur des connaissances riches et complexes, lesquelles n'auraient pu être pédagogiquement mises en valeur sans la qualité du travail de conception graphique réalisé par Mme Béatrice Saurel et Mr Christian Couvert (Graphies), que nous remercions pour cela.

Enfin, nous souhaitons remercier plus particulièrement Mme Julie Gresser et Mr Fabian Rateau de l'Office de l'eau de la Martinique d'une part, et Mmes Hélène Udo et Stéphanie Couprie de l'Agence française pour la biodiversité d'autre part, pour leur gestion des partenariats et des conventions ayant permis de mobiliser et fédérer autour de ce projet multi-territoires ; ainsi que Mmes Véronique Barre et Béatrice Gentil-Salasc pour leur remarquable attention portée à l'édition et à la finalisation du présent document.



Coordination

Julie Gresser (Office de l'eau de la Martinique)

Karl Kreutzenberger (Agence française pour la biodiversité)

Bruno Voegtlé (Bureau d'études Ecogea)

Rédaction

Karl Kreutzenberger (Agence française pour la biodiversité)

Pierre Sagnes (Agence française pour la biodiversité)

Pierre Valade (Bureau d'études Ocea Consult')

Bruno Voegtlé (Bureau d'études Ecogea)

Édition

Véronique Barre (Agence française pour la biodiversité)

Béatrice Gentil-Salasc (Agence française pour la biodiversité)

Création et mise en forme graphiques

Christian Couvert (Graphies) - Création des schémas

Béatrice Saurel - Création, illustrations d'art et mise en forme graphique

Citation

Kreutzenberger K., Sagnes P., Valade P. et Voegtlé B., 2019. Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons et les macro-crustacés dans les départements insulaires ultramarins. Principes et méthode. Agence française pour la biodiversité. Collection *Comprendre pour agir*. 176 pages.

Publications dans la collection *Comprendre pour agir*

- 1 - Éléments d'hydromorphologie fluviale (octobre 2010)
- 2 - Éléments 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 - Regards des sciences sociales sur la mise en œuvre des politiques publiques (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 - Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons Principes et méthodes (mai 2014)
- 12 - La compétence « Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations » (Gemapi) (août 2014)
- 13 - Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : éclairages et pistes d'actions pour la gestion (octobre 2014)
- 14 - Connaître les perceptions et les représentations : quels apports pour la gestion des milieux aquatiques ? (décembre 2014)
- 15 - Quelle est l'efficacité d'élimination des micropolluants en station de traitement des eaux usées domestiques ? Synthèse du projet de recherche ARMISTIQ (janvier 2015)
- 16 - Modèles hydro-économiques : quels apports pour la gestion de l'eau en France ? (mars 2015)
- 17 - Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion - Vol. 1 Connaissances pratiques (mars 2015)
- 18 - Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion - Vol. 2 Expériences de gestion (mars 2015)
- 19 - Captages Grenelle : où en est-on de la protection contre les pollutions diffuses? Comment aller plus loin ? (septembre 2015)
- 20 - Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques ? (novembre 2015)
- 21 - Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ? (novembre 2015)
- 22 - Pollution diffuse et protection de la ressource en eau : pratiques à l'échelle du territoire dans l'Union européenne (septembre 2016)
- 23 - Captages : comment favoriser la coopération entre producteurs d'eau potable et acteurs agricoles pour la mise en place de démarches de protection des aires d'alimentation de captages ? (octobre 2016)
- 24 - Combien coûte la dégradation des milieux aquatiques pour les usagers de l'eau ? L'évaluation des dépenses compensatoires (janvier 2017)
- 25 - Les zones de rejet végétalisées : repères scientifiques et recommandations pour la mise en œuvre (février 2017)
- 26 - Du dommage écologique au préjudice écologique. Comment la société prend-elle en compte et répare-t-elle les atteintes causées à l'eau et aux milieux aquatiques ? (avril 2017)
- 27 - Restauration de cours d'eau en France : comment les définitions et les pratiques ont-elles évolué dans le temps et dans l'espace, quelles pistes d'action pour le futur ? (juillet 2017)
- 28 - Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique. Expertise scientifique collective (novembre 2017)
- 29 - Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion - Vol. 3 Expériences de gestion (bis) (mai 2018)
- 30 - La prévision à moyen et long terme de la demande en eau potable : bilan des méthodes et pratiques actuelles (janvier 2019)
- 31 - Les bénéfices liés à la préservation des eaux souterraines : pourquoi et comment leur donner une valeur monétaire ? (novembre 2018)
- 32 - Lutter contre les micropolluants dans les milieux aquatiques : quels enseignements des études en sciences humaines et sociales ? (septembre 2018)
- 33 - Agro-écologie et Trame verte et bleue : des synergies à valoriser (avril 2019)
- 34 - Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons et macrocrustacés dans les départements insulaires ultramarins - Principes et méthode (décembre 2019)





ISBN web : 978-2-37785-072-3

ISBN print : 978-2-37785-073-0

Achevé d'imprimer en France par Cloître en décembre 2019

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.



Plus de 100 000 ouvrages (barrages, seuils, ponts, dalots, buses...) sont aujourd'hui recensés sur les cours d'eau français. Or, la fragmentation des milieux naturels est connue comme l'une des principales causes d'érosion de la biodiversité. De nombreuses espèces ont en effet besoin, à différents moments de leur vie, de se déplacer librement, sur des distances parfois importantes, pour accéder à des habitats préférentiels leur permettant de grandir, se reproduire, se nourrir, se reposer ou encore se protéger. La directive cadre européenne sur l'eau (DCE, 2000), sous l'action de la communauté internationale, a en ce sens appuyé l'intérêt de connaissance, de préservation ou de restauration des continuités écologiques au sein des hydrosystèmes et des corridors rivulaires.

Dans les départements insulaires d'outre-mer, un recensement en cours fait d'ores et déjà état de plus de 1 000 ouvrages sur les cours d'eau. Or, pour boucler leur cycle vital, la quasi-totalité des espèces de poissons et de macro-crustacés indigènes de ces territoires effectuent des déplacements entre les milieux marins, estuariens et fluviaux. Ces espèces sont donc très sensibles aux barrières physiques érigées sur les cours d'eau.

Comment évaluer la porosité de ces obstacles ? Pour quelles espèces et quelles configurations d'ouvrages ? Les connaissances scientifiques pour l'outre-mer permettent-elles la construction d'une démarche d'évaluation et de diagnostic standardisée ? C'est pour répondre à ces questions que l'AFB, en collaboration avec l'ensemble des DEAL et des offices de l'eau, et dans le cadre d'une réalisation menée avec Écogea et Ocea consult', a souhaité adapter la démarche ICE - pour « informations sur la continuité écologique » -, déjà mise en place en métropole.

Synthétisant les principales connaissances scientifiques et techniques sur les enjeux relatifs à la continuité écologique pour l'ichtyofaune et la caracéofaune d'outre-mer, les capacités physiques des espèces concernées, les différents types d'obstacles rencontrés et leurs impacts potentiels, ce *Comprendre pour agir*, richement détaillé et illustré, permettra à chacun de comprendre précisément la méthodologie développée, ses fondements et ses enjeux, et d'appliquer ces savoirs sur son territoire.

Karl Kreutzenberger, ingénieur des travaux publics de l'État et expert thématique mandaté auprès du ministère de l'écologie est, depuis 2013, au sein de la direction générale de l'Agence française pour la biodiversité, coordonnateur scientifique et technique de programmes nationaux de connaissances portant sur la continuité écologique et l'hydromorphologie fluviales.

Pierre Sagnes, docteur en écologie aquatique et maître de conférences pendant quinze ans à l'Université Lyon 1, est, depuis 2014, responsable du pôle de recherche et développement en écohydraulique AFB-IMFT au sein de l'Agence française pour la biodiversité, où il mène des missions d'appui technique, de recherche et de formation dans le domaine de l'écohydraulique.

Pierre Valade, ingénieur en sciences et techniques de l'eau (ISIM) et diplômé de recherche technologique en science de l'environnement (UMII), a été pendant dix ans chef de projets au CRITT ARDA. Il est, depuis 2010, gérant du bureau d'études Ocea Consult' (La Réunion), menant des études et des programmes de recherche appliquée sur le fonctionnement écologique des milieux d'eau douce insulaires tropicaux.

Bruno Voegtli, ingénieur en génie civil (ENSIP) et en hydraulique (ENSEEIHT) et cogérant du bureau d'études Écogea (Études et conseils en gestion de l'environnement aquatique) basé à Muret (Haute-Garonne). Il est spécialisé dans le domaine de l'écohydraulique et plus particulièrement en études et maîtrise d'œuvre de travaux relatifs à la restauration de la continuité piscicole.

Avec le soutien de

