

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, La 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).

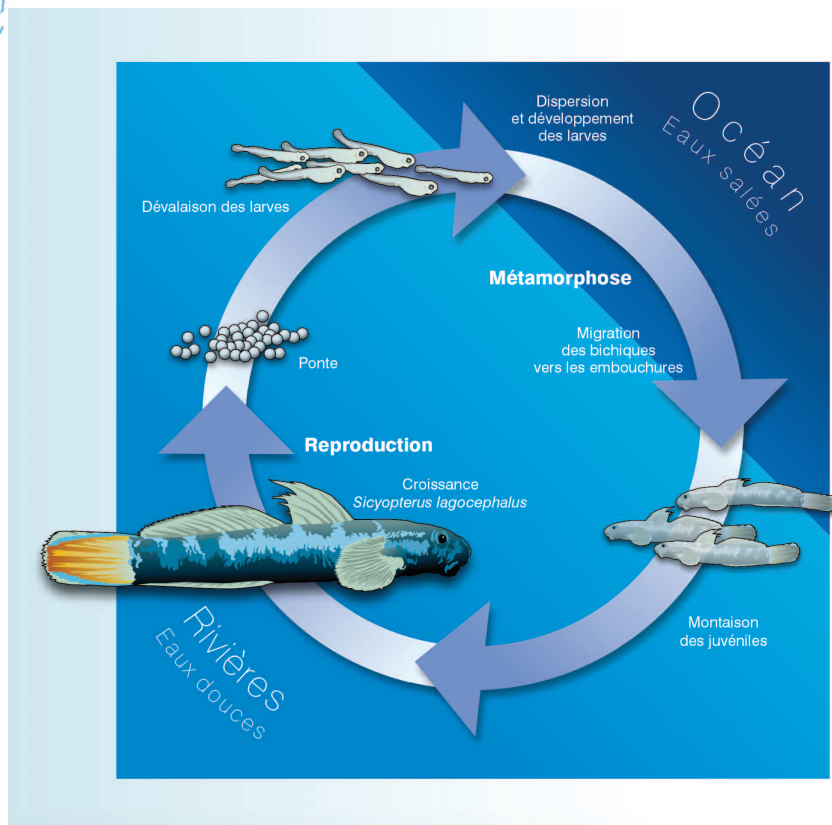
Les poissons et crustacés diadromes (amphidromes et catadromes) sont les plus représentés dans les cours d'eau, de l'embouchure jusqu'aux zones de sources, ainsi qu'en amont de chutes naturelles de plusieurs centaines de mètres (ex. : *Atyidae*, *Anguillidae* et *Sicydiinae* sur l'île de La Réunion). 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 (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 mulets 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 mulot 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 ont également un cycle de vie amphidrome (McDowall, 2007). Les migrations de mollusques et en particulier de nérithes 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-nèg, 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> *	Éléotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Eleotris mauritiana</i>	Éléotris 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>	Éléotris cyprin (F)			X	X	Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éléotris serpent (F)			X		Post-larve / Juvénile	Larve
	<i>Ophiocara porocephala</i>	Éléotris 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 mertonii</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			Juvénile / Adulte	Larve
	<i>Atya scabra</i>	Crevette (F) / cacador, bouc, grand bouc (C)	X	X			Juvénile / Adulte	Larve
	<i>Atyoida serrata</i>	Crevette bouledogue (F) (C)			X	X	Juvénile / Adulte	Larve
	<i>Caridina longirostris</i>	Caridine à long rostre (F) / chevaquine (C)			X		Juvénile / Adulte	NR
	<i>Caridina serratirostris</i>	Caridine serratulée (F) / chevaquine (C)			X	X	Juvénile / Adulte	Larve
	<i>Caridina typus</i>	Caridine type (F) / chevaquine (C)			X	X	Juvénile / Adulte	Larve
	<i>Jonga serrei</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X				Juvénile / Adulte	Larve
	<i>Micratya poeyi</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X	X			Juvénile / Adulte	Larve
	<i>Potimirim glabra</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X				Juvénile / Adulte	Larve
	<i>Potimirim potimirim</i>	Crevette (F) / petit bouc (C)	X	X			Juvénile / Adulte	Larve
Grapsidae	<i>Sesarmops impressum</i>	Crabe de rivière (C)			X		Juvénile	Larve / Adulte ?
	<i>Varuna litterata</i>	Crabe lisible (F) / crabe de rivière (C)			X	X	Juvénile	Larve / Adulte ?
Palaemonidae	<i>Macrobrachium acanthurus</i>	Écrevisse (F) / chevrette, bouquet cannelle (C)	X	X			Juvénile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium australe</i>	Chevrette australe (F) / chevrette grand bras (C)			X	X	Juvénile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium carcinus</i>	Écrevisse (F) / ouassou, z'habitant, écrevisse, bouquet pintade (C)	X	X			Juvénile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium crenulatum</i>	Écrevisse (F) / queue rouge, écrevisse, queue de madras (C)	X	X			Juvénile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium equidens</i>	Crevette à pinces longues (F) / camaron tacheté, kanmaron (C)			X		Juvénile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium faustinum</i>	Écrevisse (F) / alexis, gros mordant, écrevisse (C)	X	X			Juvénile / Adulte	Larve
	<i>Macrobrachium heterochirus</i>	Écrevisse (F) / grand bras, écrevisse (C)	X	X			Juvénile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium hirtimanus</i>	Chevrette des Mascarins (F) / écrevisse, chevrette lecroc (C) (disparue ?)				?	Juvénile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium lar</i>	Bouquet singe (F) / chevrette, camaron, kanmaron gran lebra (C)			X	X	Juvénile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Macrobrachium lepidactylus</i>	Écrevisse, bétangue (C)			X	X	Juvénile / Adulte	Larve / Adulte ?
	<i>Palaemon pandaliformis</i>	Crevette transparente (F) / bouquet potitinga (C)	X	X			Juvénile / Adulte	NR
Xiphocarididae	<i>Xiphocaris elongata</i>	Crevette (F) / pissette (C)	X	X			Juvénile / Adulte	Larve

NR : non renseigné

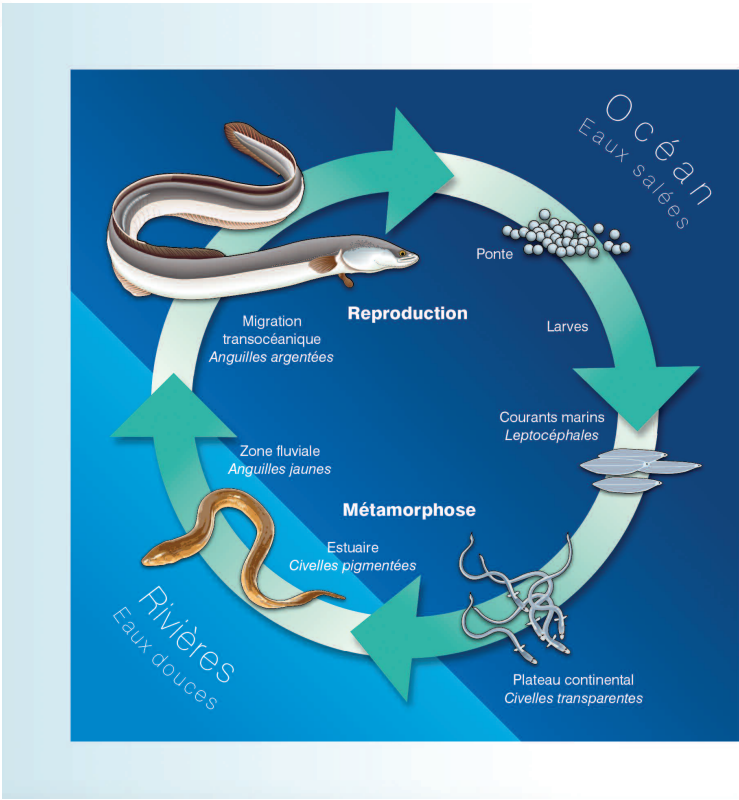
Type 2 : Les espèces catadromes

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 amphihaline 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 / Anguillette	Adulte (anguille argentée)
	<i>Anguilla bicolor bicolor</i>	Anguille bicolore (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Civelle / Anguillette	Adulte (anguille argentée)
	<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Civelle / Anguillette	Adulte (anguille argentée)
	<i>Anguilla mossambica</i>	Anguille du Mozambique (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Civelle / Anguillette	Adulte (anguille argentée)
	<i>Anguilla rostrata</i>	Anguille américaine (F) / z'anguille (C)	X	X			Civelle / Anguillette	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 lenti-ques 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	
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 évènement 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 de 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



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 Grande Rivière (Martinique), (e) Seuil de prise EDF sur la rivière Bananier (Guadeloupe), (f) Seuil hydrométrique (Martinique).

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

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. Voegtli (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.

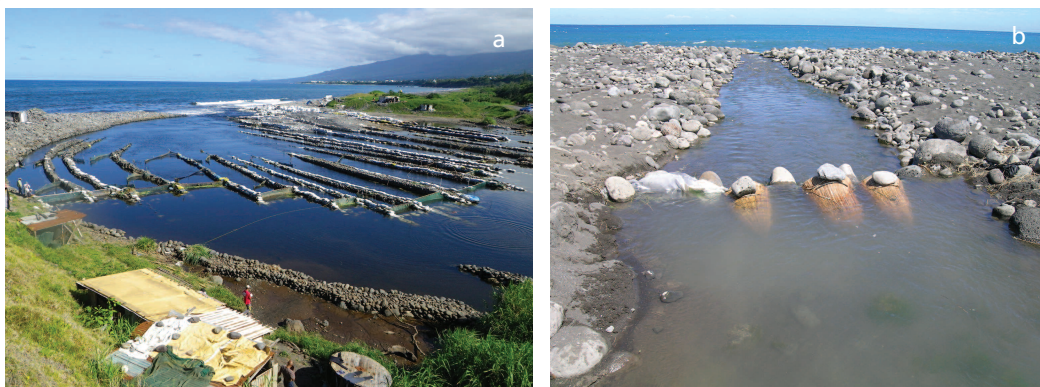
À La Réunion, l'espèce majoritairement capturée pendant la saison chaude est le bouche-ronde *Sicyopterus lagocephalus* (bichique, bichique chaleur, bichique trois quart) et, dans une moindre mesure, davantage en saison fraîche, le bouche-ronde *Cotylopus acutipinnis* (bichique fine ou sans culotte). 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 spp.*), 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



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).

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

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.

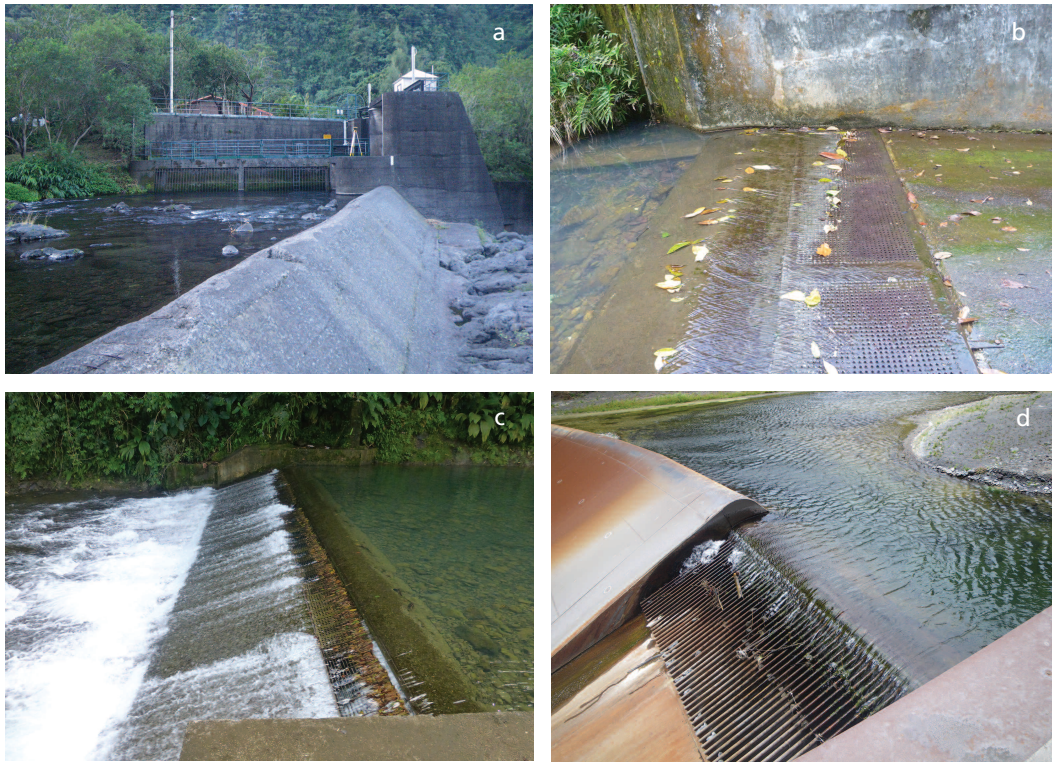
Dans le cas des centrales hydroélectriques, l'eau prélevée est turbinée, puis restituée au cours d'eau. Cependant, le passage à travers les turbines hydrauliques soumet les individus dévalants à diverses contraintes susceptibles d'entraîner des dommages importants : risques de chocs contre les parties 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 horizontaux), 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



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

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).

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 ; Voegtlié et Larinier, 2008 ; Voegtlié, 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 (au sens de la longueur totale) du poisson (L_p) 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.

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

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

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

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 ($L_{p\min}$ – $L_{p\max}$, 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).

$L_{p\text{moy}}$ représente la moyenne des deux valeurs extrêmes $L_{p\min}$ et $L_{p\max}$.



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 bicolore (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X	Anguille jaune à adulte	100	1000 (A. marmorata)	2000 (A. marmorata)
	<i>Anguilla marmorata</i>	Anguille marbrée (F) / z'amab, z'anguille (C)			X	X			500 (autres espèces)	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>	Éléotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X				
	<i>Eleotris mauritiana</i>	Éléotris brun (F) / cabot noir (C)			X	X				
	<i>Eleotris perniger</i>	Flèche (F) / pitit dormè, flèche (C)	X	X			Subadulte / Adulte	40	100	150
	<i>Gobiomorus dormitor</i>	Dormeur (F) / grand dormeur, dormeur (C)	X	X						
	<i>Guavina guavina</i>	Dormeur (F) (C)		X						
	<i>Hypseleotris cyprinoides</i>	Éléotris cyprin (F)			X	X				
	<i>Ophieleotris cf aporos</i>	Éléotris serpent (F)			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		Juvénile	15	30	40
	<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		Subadulte / Adulte	40	100	150
	<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				
	<i>Stenogobius polyzona</i>	Cabot rayé (F) (C)			X	X				
Kuhliidae	<i>Kuhlia rupestris</i>	Kuhlie 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

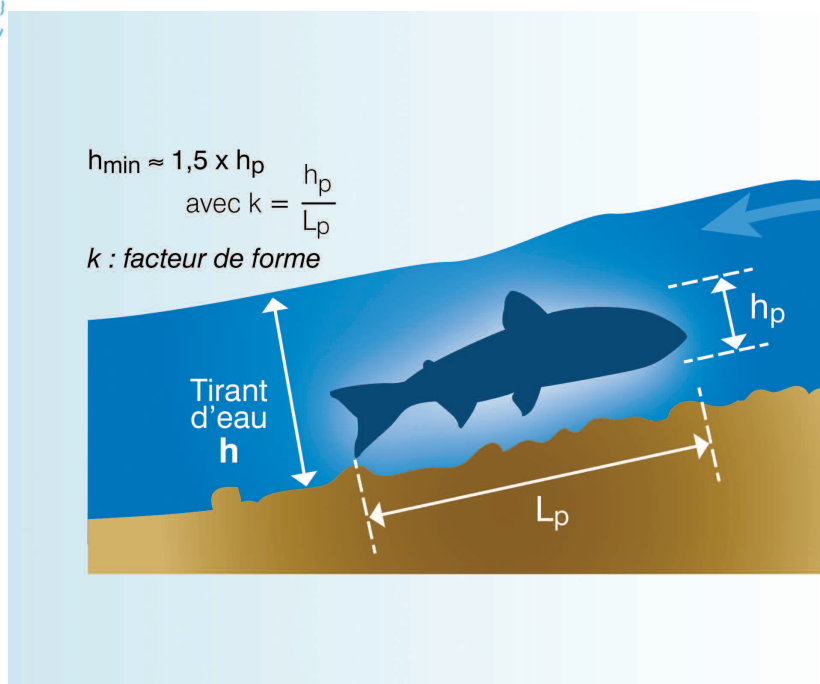


Schéma représentant le tirant d'eau minimum (h_{min}) considéré comme nécessaire pour qu'un poisson puisse nager convenablement. Adapté de Baudoin *et al.*, 2014.

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



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

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

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

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 :

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

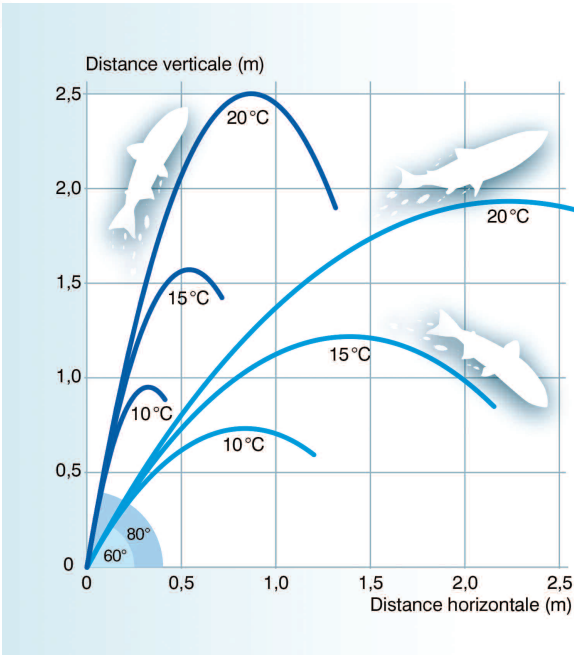
Les trajectoires théoriques de saut d'un saumon de 0,8 m de longueur ont été représentées en fonction de la température de l'eau et de l'angle d'incidence du saut (Figure 15 page 38). Ce graphique met en évidence le rôle prépondérant de la température et de l'angle d'incidence sur la hauteur franchissable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

N.B. 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

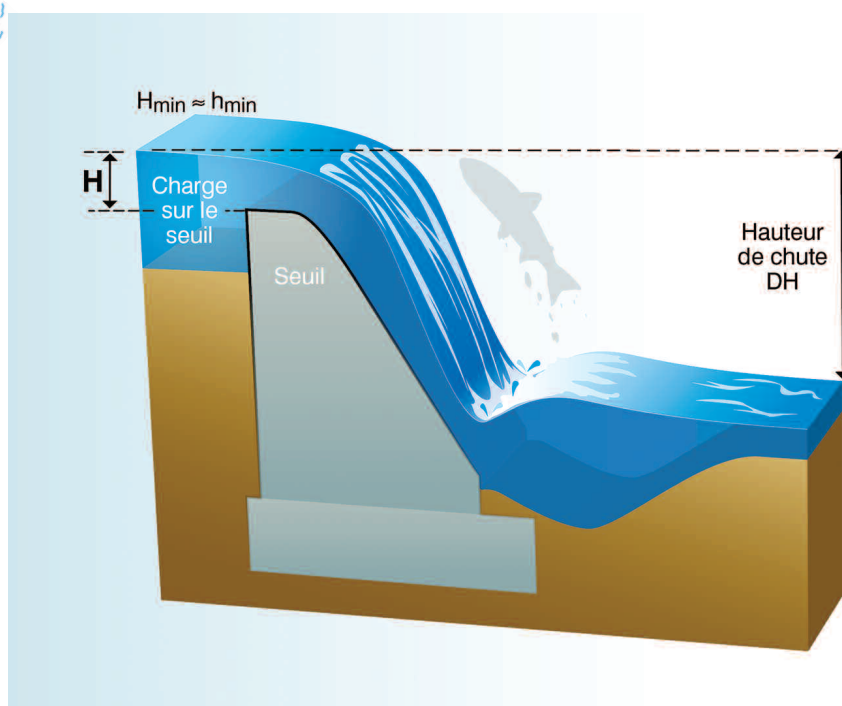
Pour le franchissement par saut, il est nécessaire que la lame d'eau sur le déversoir (seuil, chute naturelle) soit suffisante pour permettre au poisson de reprendre une nage efficace dès sa réception. Ceci est particulièrement essentiel lorsque la chute est importante et que le poisson a de fortes chances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

N.B. 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 fosse minimales sont très variables. Pour les auteurs prenant en compte la longueur du poisson, il est souvent mentionné une profondeur minimale de

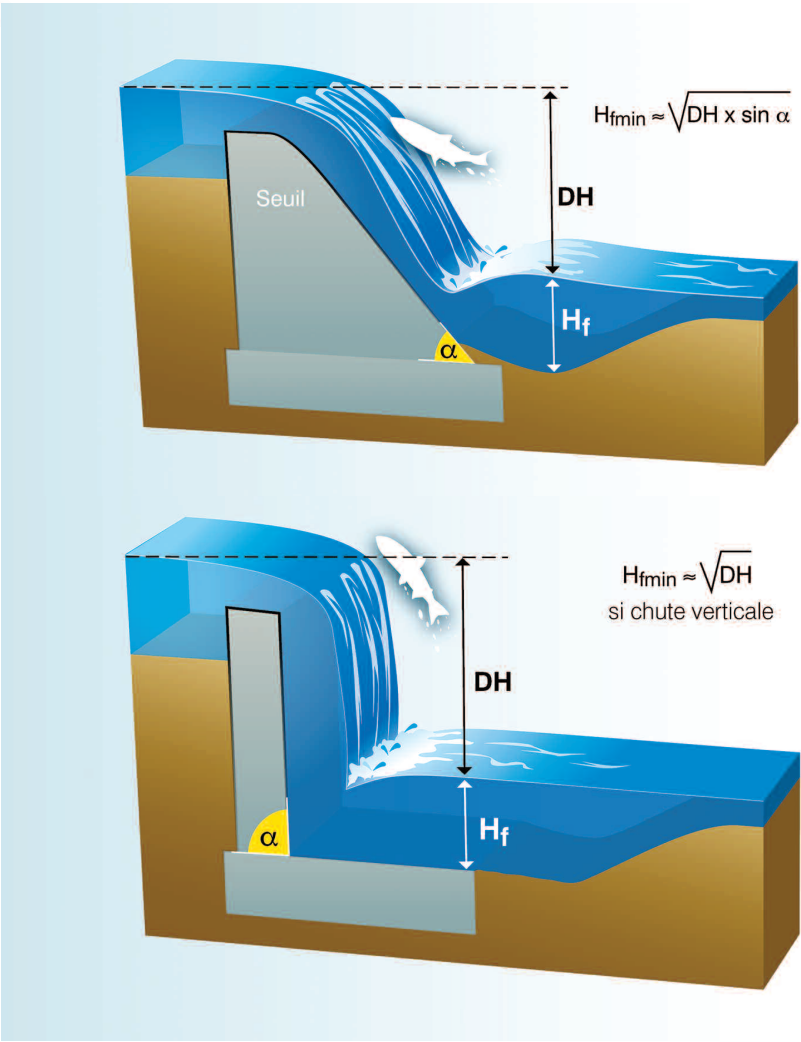
la fosse correspondant à 1 à 2 fois la longueur du corps (Meixler *et al.*, 2009). Ce critère n'intègre pas de notion d'hydraulique et de dissipation d'énergie de la chute. Pour ce cas, quelle que soit la hauteur de la chute, la profondeur minimale de fosse nécessaire reste alors la même. Ce critère tend par conséquent à proposer des valeurs minimales de profondeur de fosse 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).

N.B 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 (Hydrô Réunion)

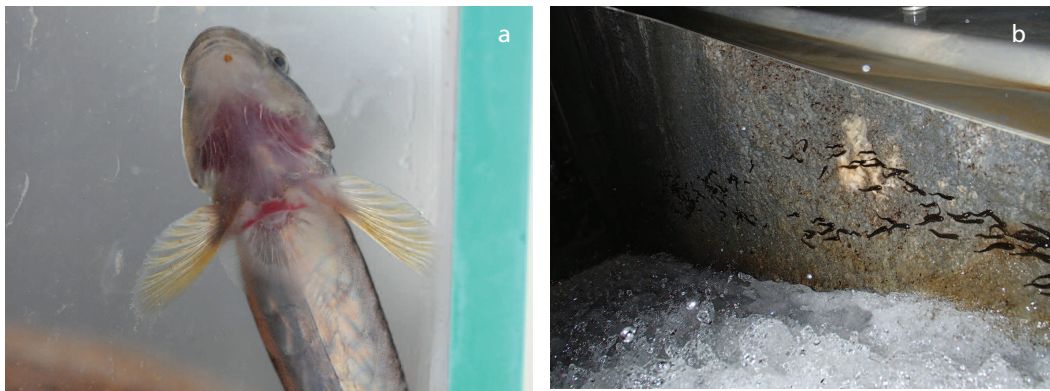
Anguilles en reptation. (a) Très jeunes stades d'anguilles (civelles légèrement pigmentées) en montaison sur des parois verticales. C'est ici essentiellement la tension superficielle qui leur permet de s'accrocher au substrat, (b) Anguille en migration sur un substrat de reptation adapté et offrant un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

