

Diagnostic de la franchissabilité à la montaison

- 
- A detailed illustration of an underwater scene. In the upper left, a school of small, silver fish swims. Below them, a large, dark eel with a lighter underbelly is shown in a curved, swimming posture. To the right, another eel is visible, partially obscured by a large, translucent, wavy structure that resembles a jellyfish or a large piece of seaweed. In the bottom left corner, a crab is depicted, facing upwards. The background is a deep blue with subtle light rays and bubbles, creating a sense of depth and movement.
- 72 ■ Cas des éléments fixes des seuils et barrages
 - 110 ■ Cas des éléments mobiles associés à un ouvrage
 - 117 ■ Cas des ouvrages routiers et ferroviaires
 - 134 ■ Cas des ouvrages complexes ou mixtes
 - 137 ■ Le cas particulier de l'anguille
 - 146 ■ Le cas particulier du ventousage et de l'escalade par les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques
 - 152 ■ Le cas particulier de la marche par les macro-crustacés



Cas des éléments fixes des seuils et barrages

Les différentes configurations rencontrées

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

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

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

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

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

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

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

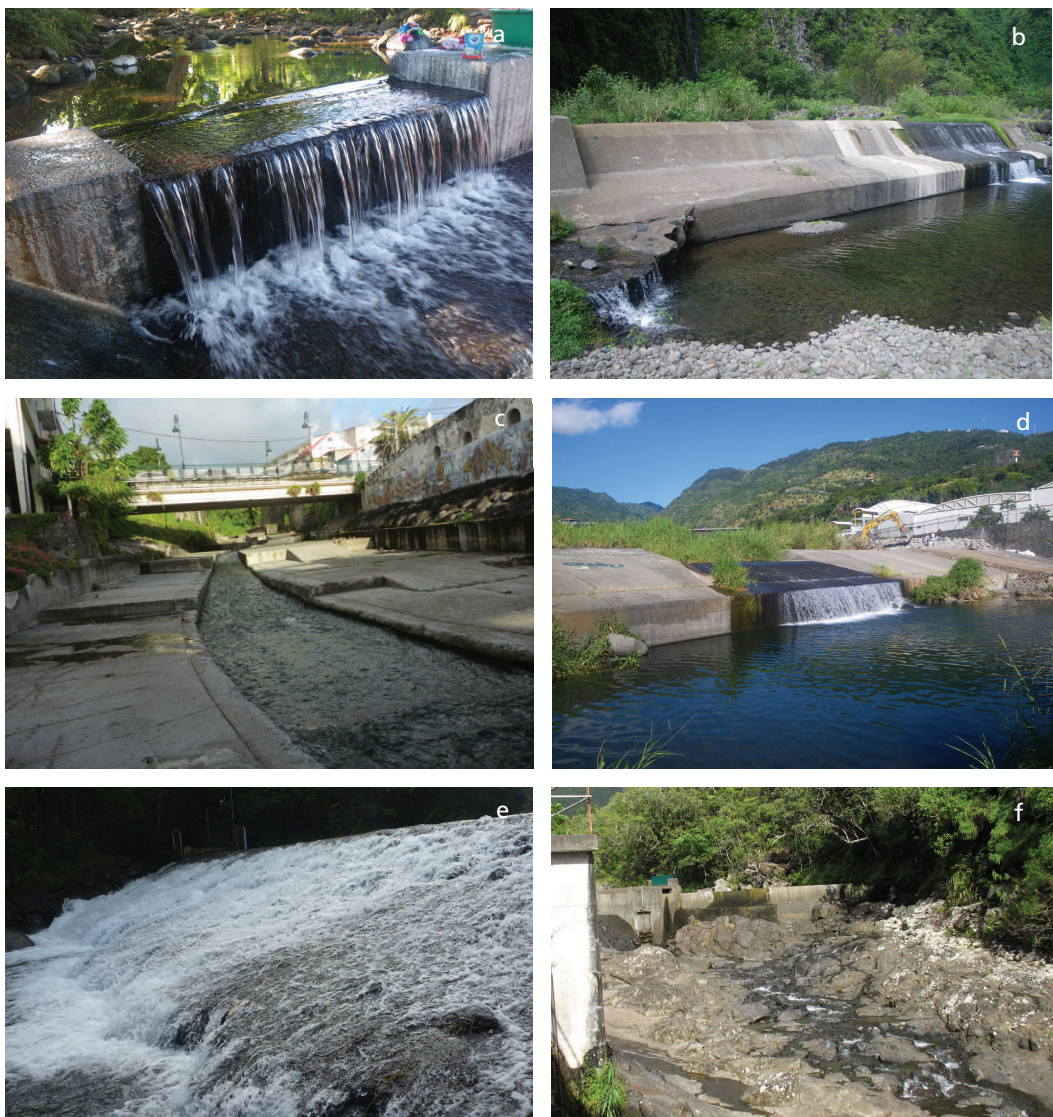
Un redan est un décrochement dans le parement du seuil venant briser la continuité du profil du seuil. La présence d'un ou plusieurs redans sur un seuil (seuil en escalier, présence d'une rehausse en crête de seuil...) peut significativement dégrader la franchissabilité d'un seuil, plus particulièrement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

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



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

Figure 31



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

Différentes configurations d'obstacles de types « seuil » ou « barrage ».
(a) Seuil vertical présentant un jet plongeant, (b) Seuil complexe présentant une chute aval et un coursier avec redan en amont, (c) Seuil incliné à faible pente, (d) Seuil incliné présentant une chute aval verticale, (e) Seuil incliné présentant une petite chute aval, (f) Seuil vertical poursuivi en aval par un coursier en enrochements liaisonnés au béton.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Critères de franchissabilité pour les espèces piscicoles sauteuses

Comme précisé au chapitre relatif aux capacités de franchissement des poissons, dès lors que la fosse en pied de chute est adaptée, les poissons sauteurs sont capables d'effectuer des sauts de hauteur maximale de l'ordre de $L_p / 2 + (U_{\max} \sin \beta)^2 / 2g$ (Tableau 6 page 38). Dès lors que la hauteur et la longueur du saut sont suffisantes, les individus concernés pourront reprendre leur migration vers l'amont si la charge et les vitesses de courant à l'endroit où ils retombent (crête du seuil ou amont immédiat) ne sont pas limitants.

Définition des classes de franchissabilité

Sur la base du tableau 9 (chapitre précédent page 67), donnant les hauteurs de saut maximales théoriques associées à la classe de taille retenue pour l'espèce et le stade considérés (c.-à-d. pour le sous-groupe considéré), la classification suivante est proposée, sous réserve d'une charge sur le seuil et d'une profondeur de fosse suffisantes :



- si la hauteur de chute DH est inférieure à la hauteur de saut théorique ($DH_{\min}$) associée à la taille minimale $L_{p\min}$ des poissons du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact limité (Classe ICE = 1)** ;
- si la hauteur de chute DH est comprise entre les hauteurs de saut théoriques associées aux tailles minimale $L_{p\min}$ ($DH_{\min}$) et « moyenne » $L_{p\text{moy}}$ (DH_{moy}) du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact significatif (Classe ICE = 0,66)** ;
- si la hauteur de chute DH est comprise entre les hauteurs de saut théoriques associées aux tailles « moyenne » $L_{p\text{moy}}$ (DH_{moy}) et maximale $L_{p\max}$ ($DH_{\max}$) du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact majeur (Classe ICE = 0,33)** ;
- enfin, si la hauteur de chute DH est supérieure à la hauteur de saut théorique ($DH_{\max}$) associée à la taille maximale $L_{p\max}$ des poissons du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière totale (Classe ICE = 0)**.

Critères de franchissabilité pour les espèces piscicoles nageuses, non sauteuses

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

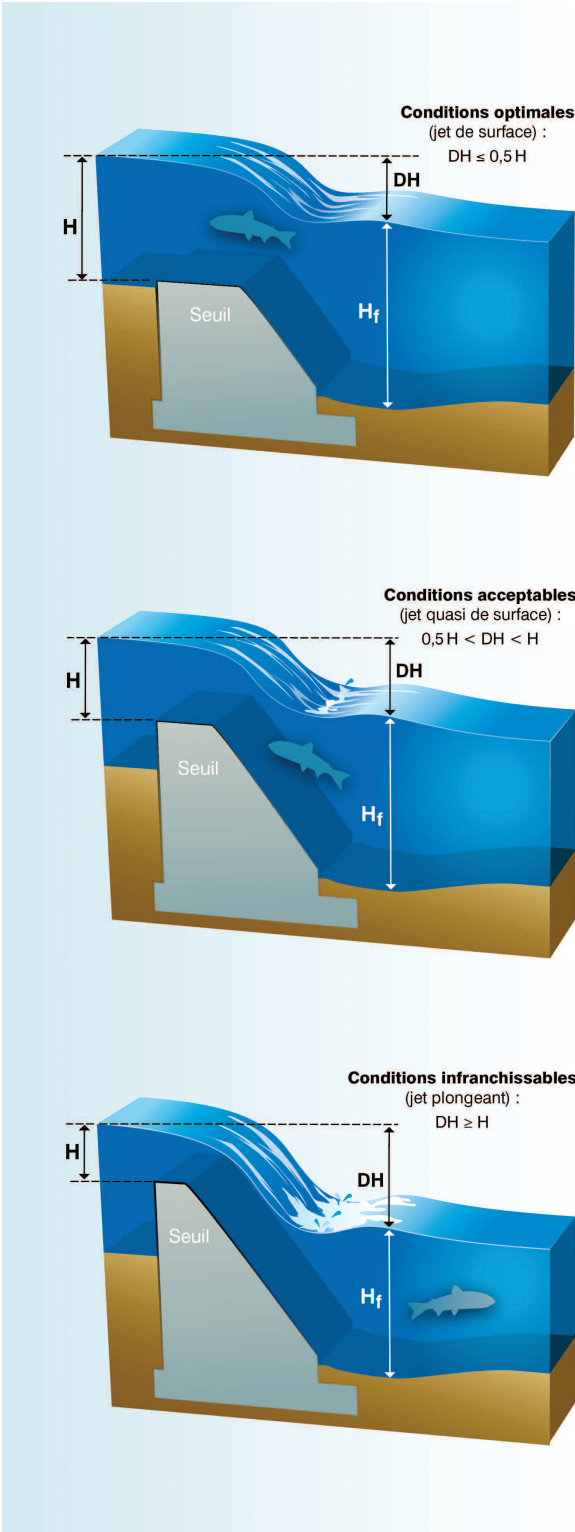
Les espèces peuvent toutefois franchir une chute verticale par la nage lorsque les conditions d'écoulement répondent à plusieurs critères (Figure 32 page 76), à savoir :

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

La classification suivante a été retenue, à la condition bien évidemment que les autres critères soient respectés (écoulement de surface, profondeur de fosse et charge suffisantes) :

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

Figure 32



© B. Voegtli (Ecogea)

Jet de surface



© B. Voegtli (Ecogea)

Jet quasi de surface



© B. Voegtli (Ecogea)

Jet plongeant

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



Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

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

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

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

Tableau 10 Ordre de grandeur de la profondeur minimale de fosse ($H_{f_{min}}$) nécessaire pour permettre au poisson de franchir un obstacle à parement vertical ou quasi-vertical (pente > 150 %), en fonction de la hauteur de chute (DH). D'après Baudoin et al., 2014

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

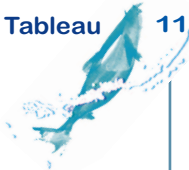


Tableau 11

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

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

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



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

■ Arbre décisionnel

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

1. Analyse de la charge sur l'obstacle

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

Si $H < H_{\min}$, l'obstacle peut être considéré, dans ces conditions hydrologiques, comme une barrière totale au sens de la méthode ICE (Classe ICE = 0). *Il convient toutefois de poursuivre l'analyse (aller en 2) afin d'apprécier la classe de franchissabilité dans le cas où des conditions hydrologiques différentes permettraient d'assurer une charge suffisante. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site dans d'autres conditions hydrologiques.*

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

2. Analyse de la fosse en pied d'obstacle

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

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

3. Espèces sauteuses

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

Sinon, aller en 4.

4. Type d'écoulement

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

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

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

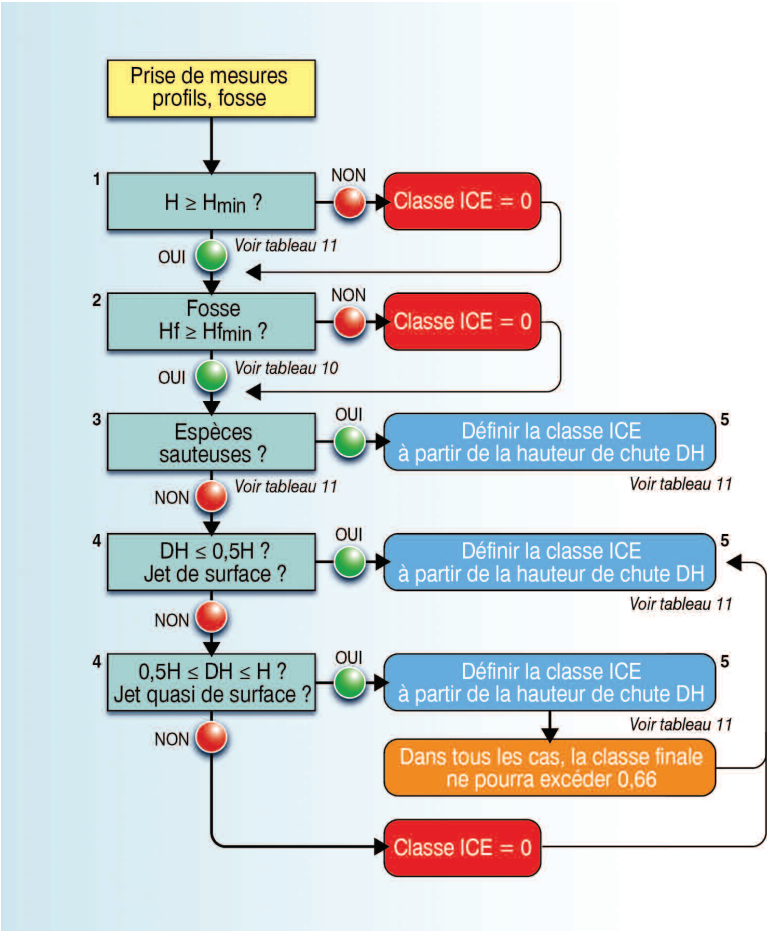
N.B. Si l'écoulement se trouve proche des transitions entre écoulements plongeant, quasi de surface ou de surface, il peut être intéressant de poursuivre l'analyse et d'aller en 5 afin d'apprécier sommairement la classe de franchissabilité pour des conditions hydrologiques plus favorables (passage en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

5. Analyse de la chute

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



Figure 33



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

Les seuils à parement aval incliné (pente ≤ 150 %)

Les seuils présentant un coursier aval incliné peuvent permettre le passage des poissons par la nage.

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

Critères de franchissabilité piscicole sur un seuil incliné uniforme

■ Les conditions d'écoulement

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

La vitesse de l'écoulement le long du coursier d'un seuil augmente vers l'aval jusqu'à ce que l'écoulement devienne uniforme, le tirant d'eau restant alors à peu près constant tout au long de la portion (Figure 34, page 83). La distance à partir de laquelle l'écoulement devient uniforme augmente avec le débit unitaire (débit par mètre de largeur, q) et diminue avec la rugosité du parement.

Afin d'analyser l'évolution des conditions d'écoulement dans le cas le plus simple d'un seuil caractérisé par un coursier ayant une pente régulière, sans rupture de pente ou présence de redan, des modélisations hydrauliques des conditions d'écoulement ont été effectuées à l'aide du logiciel *HEC-RAS* (développé par *US Army Corps of Engineers*) dans le cadre de l'élaboration de la méthode ICE en métropole (Baudoin *et al.*, 2014).

Les analyses ont été conduites sur un seuil associé à une chute de 5 m (Figure 35) en faisant varier différents paramètres physiques et hydrauliques pouvant influencer les conditions d'écoulements, à savoir :

- **la pente du coursier.** Au total, sept pentes ont été testées : 3 % (1,7°), 6 % (3,4°), 12 % (6,8°), 25 % (14°), 50 % (26,6°), 100 % (45°) et 150 % (56°) ;

- **la longueur du coursier.** La longueur a été adaptée en fonction de la pente pour assurer la chute fixe de 5 m de hauteur ;

- **la rugosité du coursier.** Pour prendre en compte les diverses rugosités du coursier, sept coefficients de Manning - Strikler (*n*) ont été testés : 0,010 (substrat très lisse équivalent à un coursier en béton taloché), 0,015, 0,020, 0,030, 0,040, 0,050 et 0,060 (très forte rugosité, équivalent à des maçonneries grossières) ;

- **le débit unitaire ou débit par mètre de largeur.** Sept débits unitaires ont été testés : 0,125, 0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 et 2,0 m³/s/m.

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

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

Ces graphiques mettent en évidence :

- l'accélération de l'écoulement depuis la crête jusqu'à une distance à partir de laquelle l'écoulement devient uniforme (vitesses et tirants d'eau constants) ;

- une vitesse atteinte d'autant plus élevée que le débit unitaire est important ;

- une distance à partir de laquelle l'écoulement devient uniforme, cette distance augmentant avec le débit unitaire et diminuant avec la rugosité.

À titre d'exemple, sur la figure 36a, pour un seuil à 12 % de pente présentant un coefficient de Manning égal à 0,015, il peut être observé que pour un débit unitaire de 125 l/s/m, la vitesse augmente progressivement pour se stabiliser à une valeur de l'ordre de 2,8 m/s à environ 7 m de la crête du seuil. Pour un débit unitaire plus conséquent de 500 l/s/m, l'écoulement ne devient uniforme qu'à une distance de l'ordre de 11 m de la crête. À cette distance, la vitesse devient constante et voisine de 4,5 m/s.

■ Modélisation de la franchissabilité piscicole

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

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

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

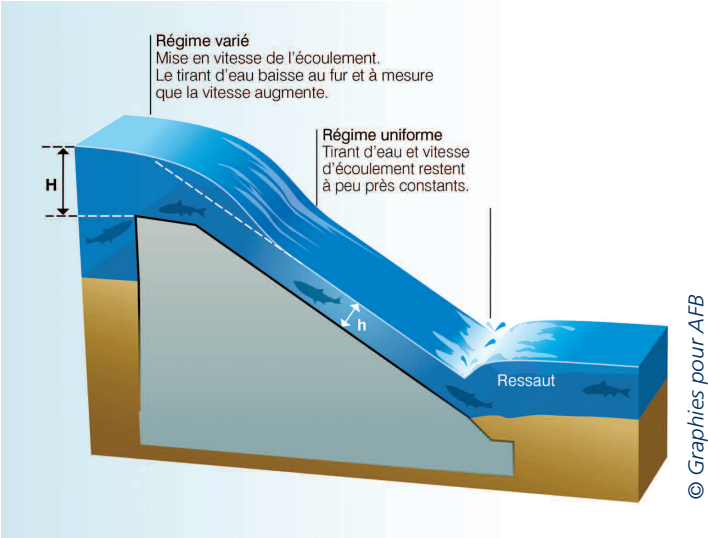
L'endurance requise *t(D)* pour franchir une distance *D* à partir de la crête peut alors s'exprimer par :

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

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

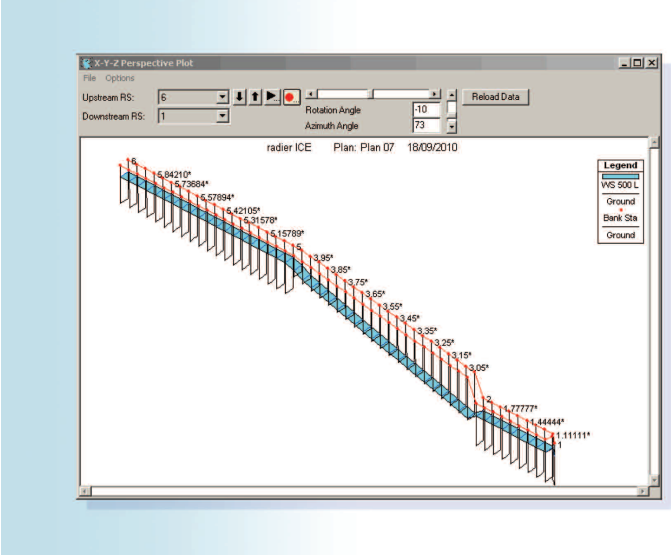


Figure 34



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

Figure 35

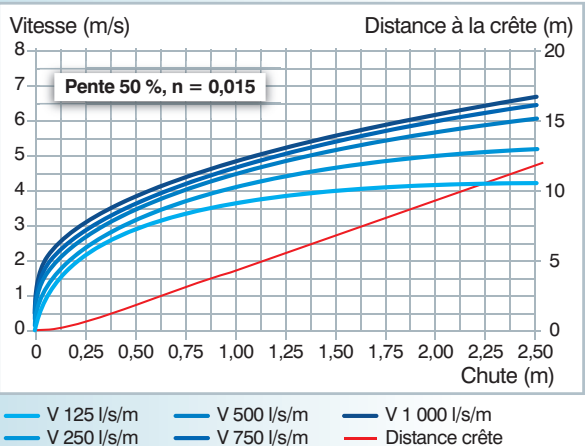
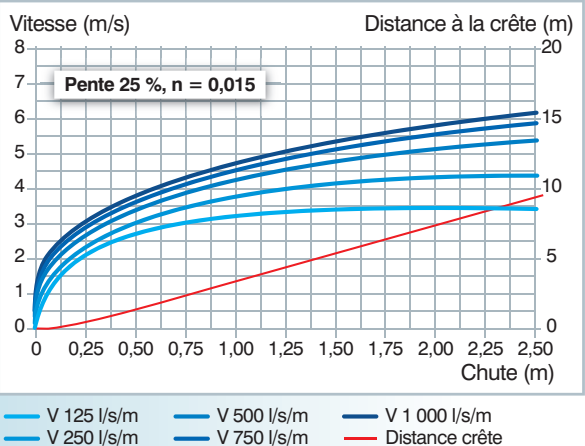
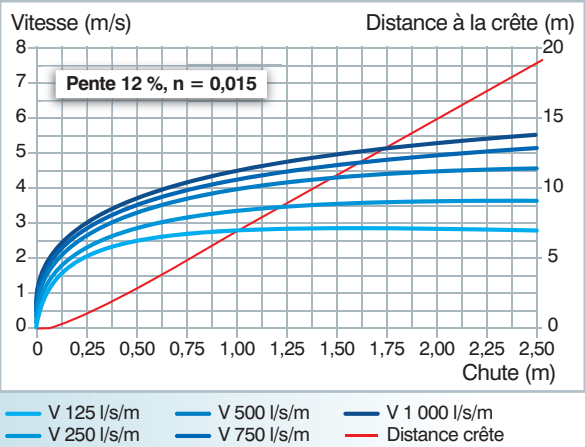


Extrait graphique d'une modélisation hydraulique effectuée sous HEC RAS. D'après Baudoin et al., 2014.

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

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

Les abaques ont été tracés pour 6 pentes (de 3 % à 100 %), 7 débits (de 0,125 m³/s/m à 2 m³/s/m), 7 rugosités (coefficients de Manning n de 0,01 à 0,06), ce qui représente environ 300 abaques similaires à celle de la figure 37 et 3 000 relations endurance / chute franchissable.



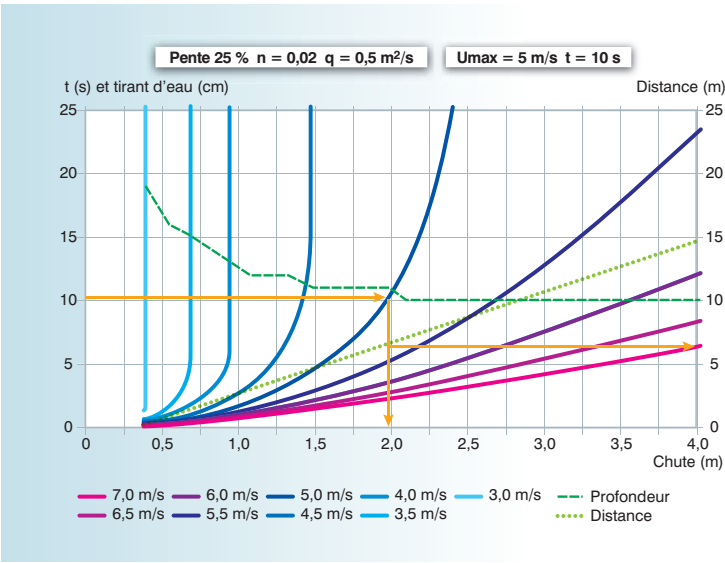
Représentation graphique montrant la relation entre la vitesse d'écoulement, la chute et la distance à la crête en fonction du débit unitaire (125 l/s/m à 1 000 l/s/m) pour une pente donnée (12 %, 25 % et 50 %) et une rugosité donnée du coursier (coefficient de Manning $n = 0,015$). D'après Baudoin et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

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

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

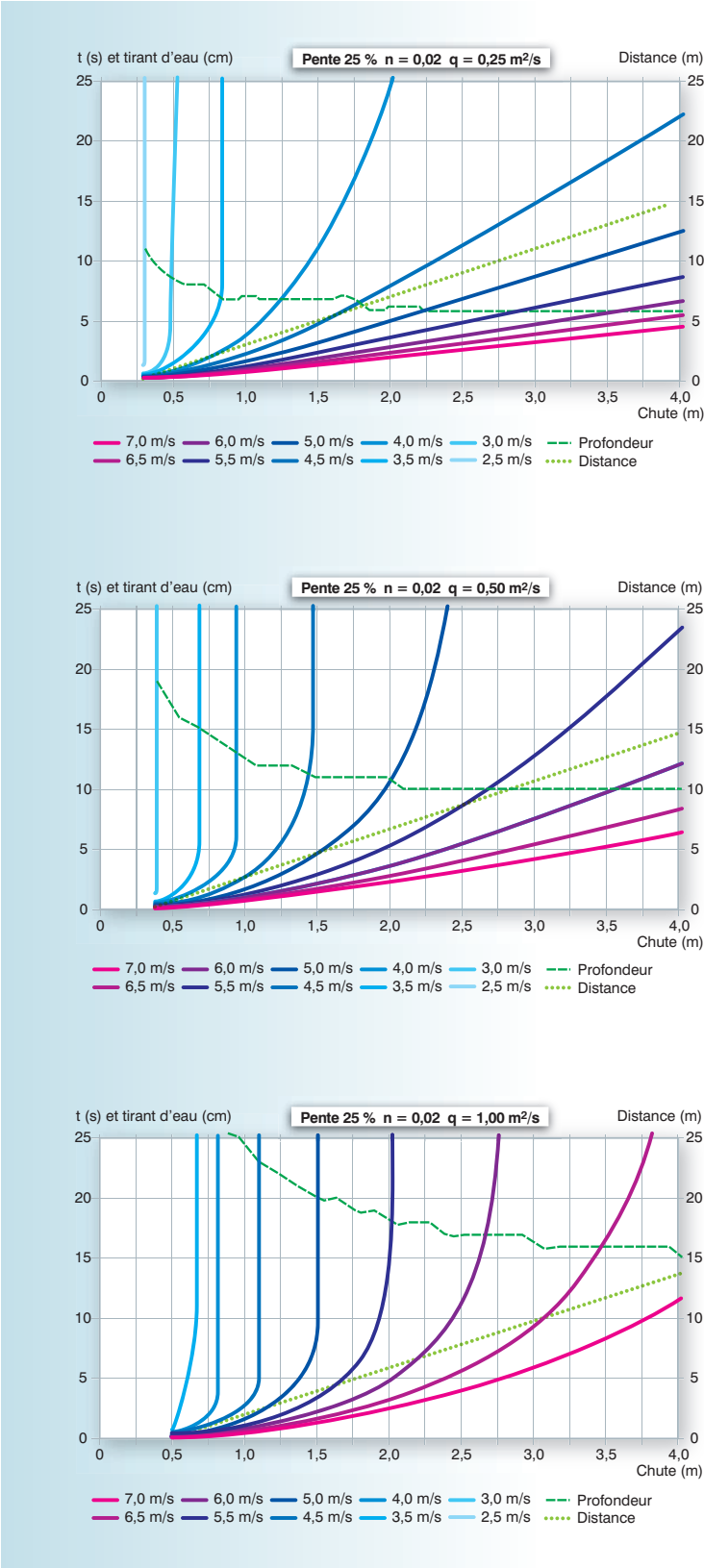
Cet abaque indique par exemple que, pour un poisson ayant une vitesse maximale de nage de $U_{max} = 5 \text{ m/s}$ et une endurance de $t = 10 \text{ s}$, la chute franchissable est légèrement inférieure à 2 m et la distance franchissable de l'ordre de 6,5 m. Le tirant d'eau sur le radier (courbe en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

Figure 37



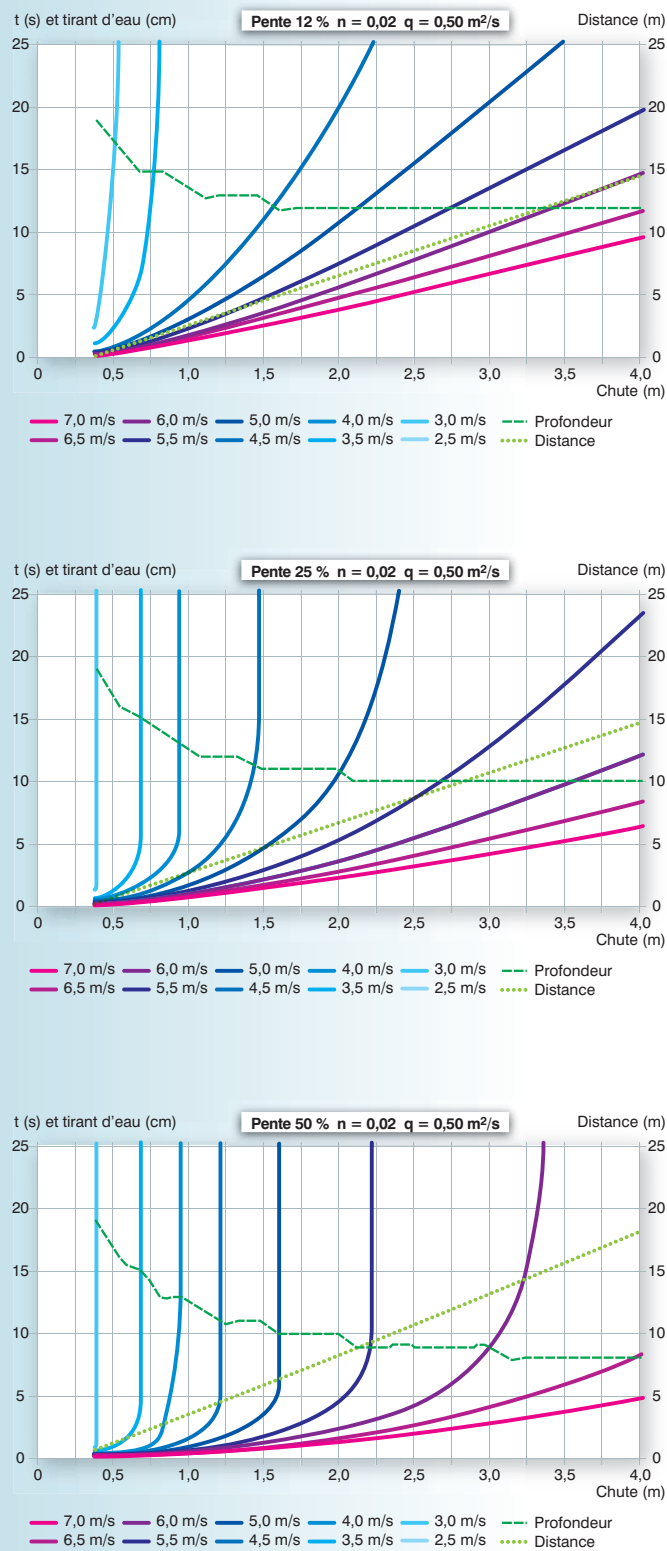
Relation entre la chute franchissable par la nage par un poisson, sa vitesse maximale de nage et son endurance (pente = 25 %, rugosité $n = 0,020$, débit unitaire $q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$). D'après Baudoin et al., 2014.

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

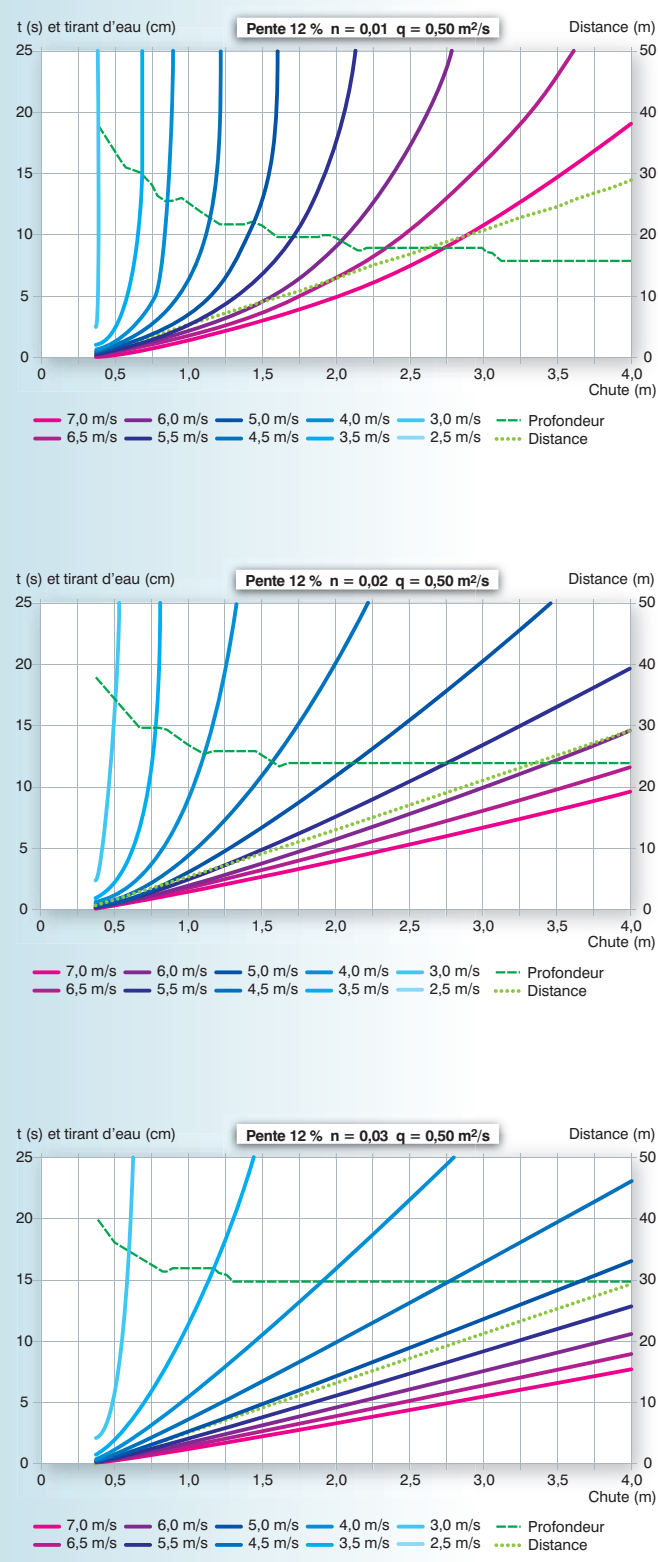


Évolution des chutes franchissables par la nage par un poisson en fonction de sa vitesse maximale de nage (U_{max}) et de son endurance (t), pour un coursier donné (pente 25 %, rugosité $n = 0,020$). Les trois abaques correspondent à 3 débits unitaires différents ($q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$,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





Évolution des chutes franchissables par la nage par un poisson en fonction de sa vitesse maximale de nage (U_{max}) et de son endurance (t), pour un débit unitaire donné ($q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s/m}$). Les trois abaques correspondent à des coursiers de différentes pentes (12 %, 25 % et 50 %) présentant une rugosité constante ($n = 0,020$). D'après Baudoin et al., 2014.



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



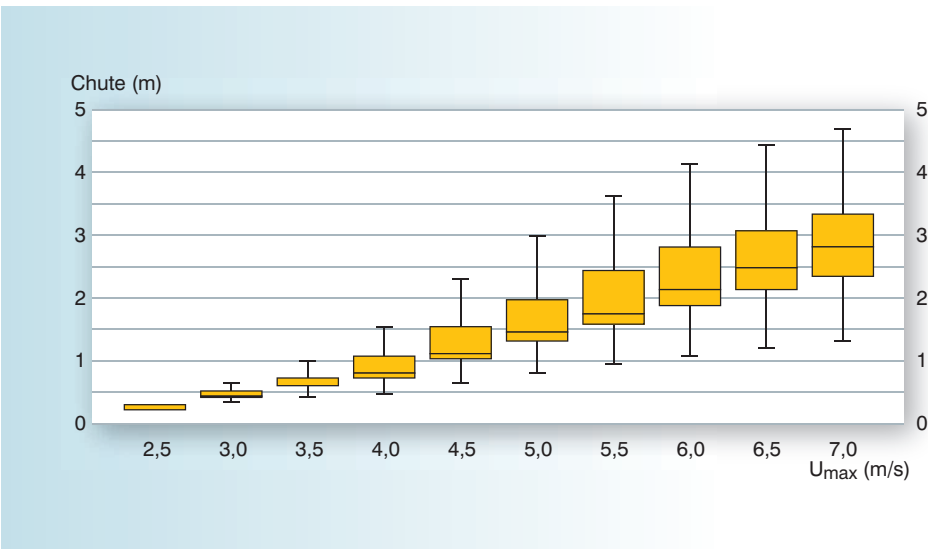
■ Analyse statistique des résultats

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

Il apparaît que pour des poissons nageant à une vitesse maximale U_{max} donnée (endurance de 10 à 20 s), la chute franchissable est dans une très large mesure déterminée par cette vitesse maximale de nage (Figures 38 à 40 pages 86 à 88). Les autres paramètres comme le débit unitaire, la rugosité, et plus particulièrement la pente, ont une influence beaucoup moins marquée.

Le graphique présenté en figure 41 représente, sous forme de boîtes de dispersion, l'évolution de la chute franchissable en fonction de la vitesse de nage U_{max} du poisson (en considérant une endurance comprise entre 10 et 20 s) pour l'ensemble des conditions de pente, de débit unitaire et de rugosité testé.

Figure 41



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

■ Définition des classes de franchissabilité

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

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

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

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

Redans sur le seuil

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

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

Figure 42



Exemples de redans au niveau de seuils inclinés.
(a) Exemple de seuil avec redan (rivière Boungoumouhé, Mayotte), (b) Exemple de seuil avec redan (Rivière Blanche, Martinique)

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

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

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

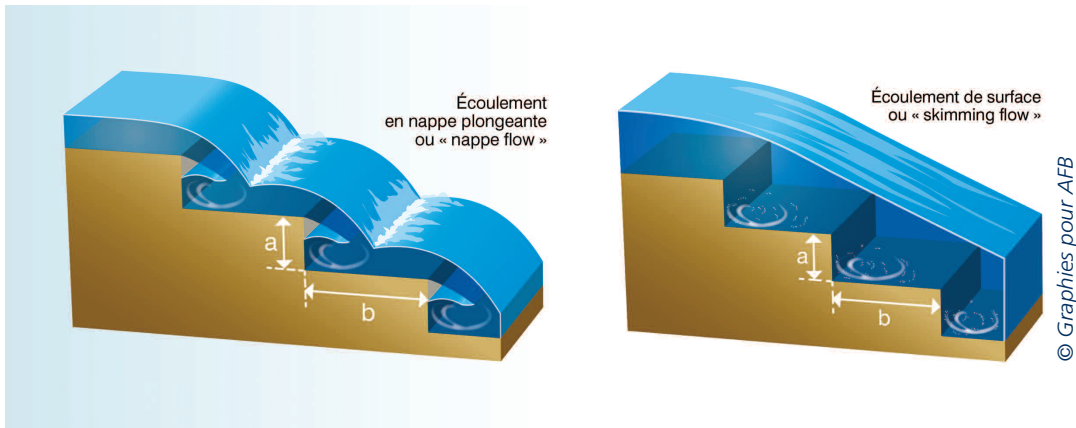
Un redan est caractérisé par sa hauteur (a) et sa longueur horizontale ou quasi-horizontale (b).

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

La figure 44 présente, pour des hauteurs de redan comprises entre 0,1 et 1 m et des rapports a/b variant entre 0,25 et 2, les débits unitaires de transition entre les deux formes d'écoulement.

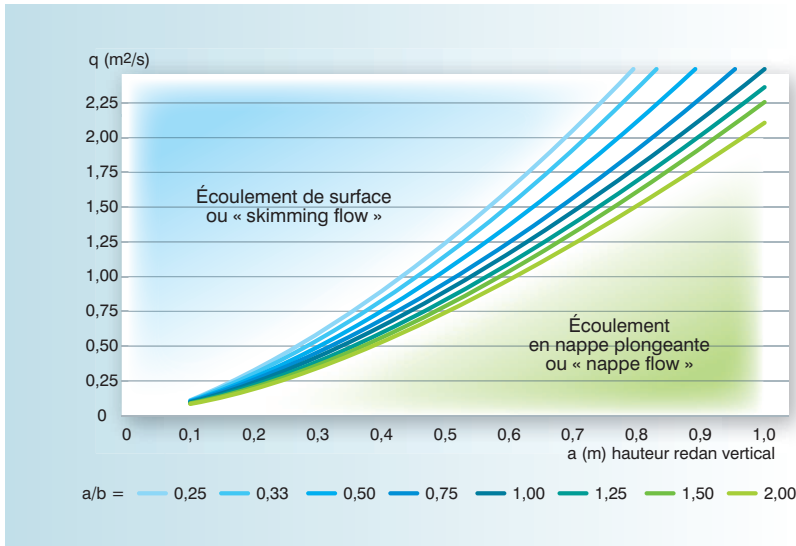


Figure 43



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

Figure 44



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

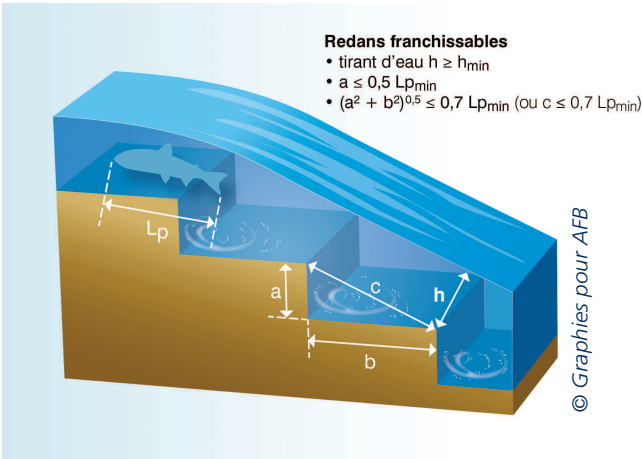
Il a été considéré qu'un poisson ne peut franchir un redan que par la nage, et seulement si les exigences suivantes sont remplies (Figure 45, page 92) :

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

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

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

Figure 45



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

N.B. La position du redan sur le radier peut influencer le franchissement de façon différente en fonction des débits transitant par l'obstacle. Par exemple, un redan situé en partie supérieure de seuil peut avoir un impact plus important qu'un redan situé en aval, susceptible d'être noyé en conditions hydrologiques plus fortes.

Attention. Dans le cadre de la méthode ICE, il faut considérer la présence d'un redan dès lors qu'une partie du seuil présente un coursier de pente supérieure à 150 % poursuivie en aval par un coursier à pente plus faible et inférieure à 150 %.

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

Présence d'une chute aval

Les seuils à parement incliné présentent souvent une chute à leur extrémité aval, susceptible de réduire la franchissabilité de l'ouvrage (Figures 46 et 47).

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

La franchissabilité globale de l'ouvrage est déterminée à partir de la franchissabilité du seuil incliné et de la chute aval selon les règles définies dans le tableau 12, et selon la même méthodologie que celle adoptée pour les ouvrages complexes ou mixtes (voir chapitre dédié aux ouvrages complexes).

Figure 46

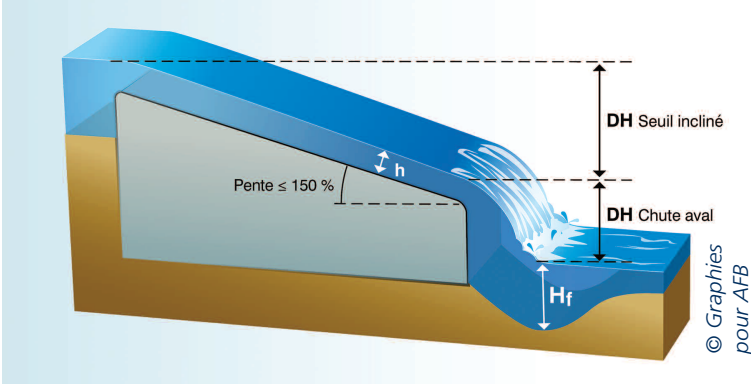


Schéma de principe d'un seuil incliné avec chute aval. D'après Baudoin et al., 2014.

Figure 47



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

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

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

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

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Le tableau 13 présente les hauteurs de fosse minimales ($H_{f_{min}}$) nécessaires, en fonction de la hauteur de chute et de l'angle d'incidence du jet (ou de la pente du coursier).

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

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

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

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

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

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

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

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

■ Arbre décisionnel

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

1. Analyse de l'éventuelle chute aval

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

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

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

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

2. Analyse de la fosse en pied d'obstacle

Si l'obstacle présente une chute aval prépondérante par rapport à la chute totale de l'obstacle ($DH_{\text{chute aval}} > DH_{\text{seuil incliné}}$), la profondeur de la fosse en pied de chute doit être vérifiée.

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

Si l'obstacle ne présente pas de chute aval ou si la chute aval n'est pas prépondérante par rapport à la chute totale ($DH_{\text{chute aval}} < DH_{\text{seuil incliné}}$), alors la profondeur de la fosse en pied d'obstacle doit être vérifiée à partir du tableau 13, en considérant la chute totale de l'obstacle ($DH = DH_{\text{seuil incliné}} + DH_{\text{chute aval}}$) et l'angle d'inclinaison du seuil. Si $H_f \geq H_{f\min}$ (Tableau 13 page 93), la profondeur de fosse est suffisante, aller en 3. Si $H_f < H_{f\min}$, l'obstacle peut alors être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

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

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

Si $h < h_{\min}$, l'obstacle peut être considéré, dans ces conditions hydrologiques, comme une barrière totale au sens de la méthode ICE (Classe ICE = 0). *Il convient toutefois de poursuivre l'analyse (aller en 4) afin d'apprécier la classe de franchissabilité dans le cas où des conditions hydrologiques différentes permettraient d'assurer un tirant d'eau suffisant. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site dans d'autres conditions hydrologiques.*

4. Analyse des redans sur le seuil à parement incliné

Si l'obstacle ne présente pas de redans ou si les redans sont considérés comme négligeables ($h \geq 2a$), aller directement en 5.

Si une des dimensions (a ou c) d'un seul des redans présents dépasse la valeur maximale $a_{\max}$ ou $c_{\max}$ (Tableau 14), alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

Si les dimensions (a et c) de chaque redan sont inférieures aux valeurs seuils ($a_{\max}$ et $c_{\max}$, Tableau 14), aller en 5.



5. Analyse de la chute du seuil à parement incliné

À partir de la hauteur de chute DH au niveau du seuil incliné (DH_{seuil incliné} ou DH s'il n'y a pas de chute aval), puis du tableau 14, définir la classe de franchissabilité ICE du seuil à parement incliné.

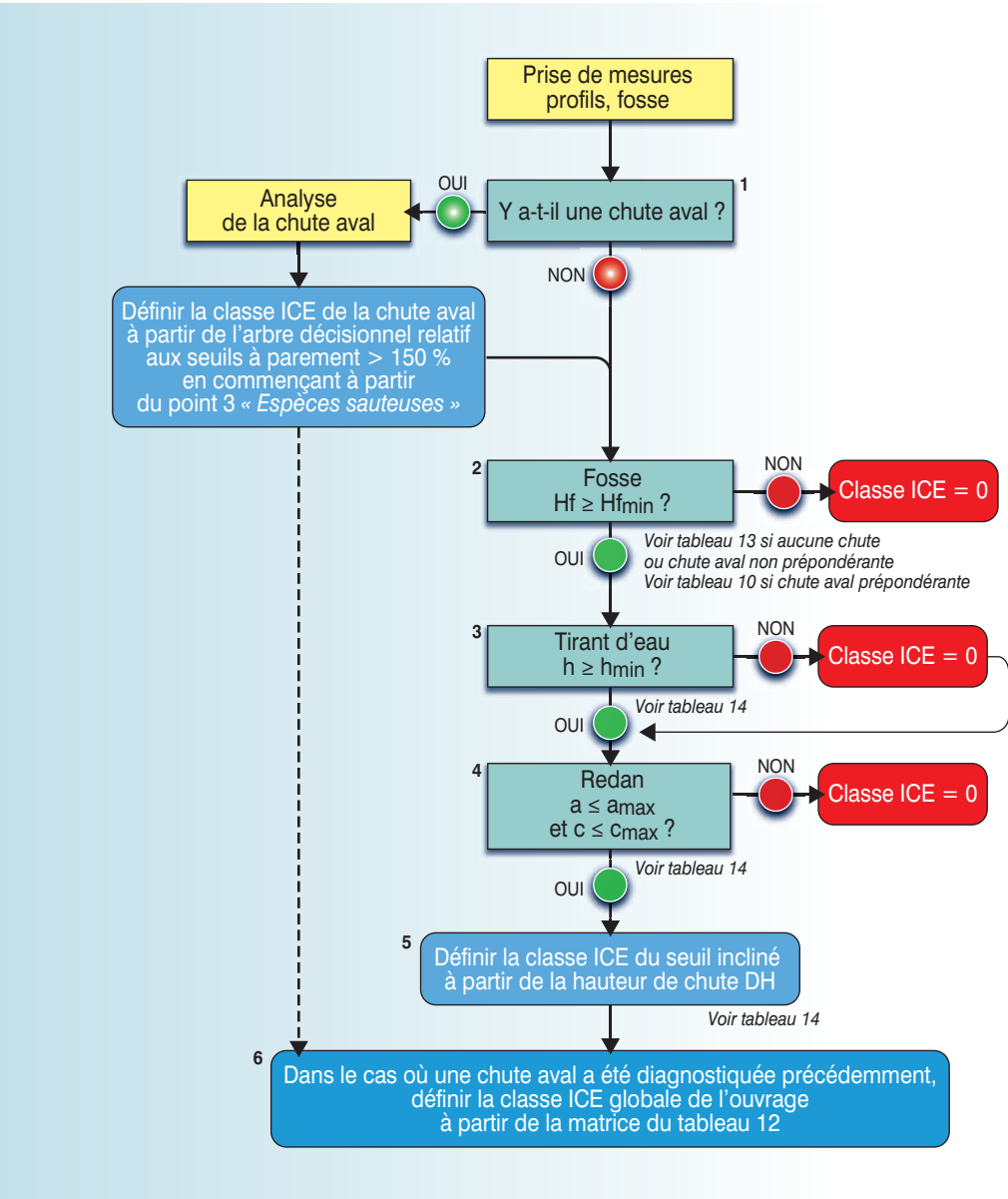
Puis aller en 6.

6. Analyse de la franchissabilité globale de l'ouvrage

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

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

Figure 48



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

Le cas particulier des seuils en enrochements

Généralités

En outre-mer, il est possible de rencontrer des seuils en enrochements, présentant des configurations multiples et des hauteurs très variables, allant de moins de 1 m à plusieurs mètres (Figure 49).

Suivant la configuration des sites (caractéristiques physiques, hydrauliques), il est possible de rencontrer plusieurs types d'agencement des enrochements. Ce type de seuil peut par exemple être constitué d'une ou plusieurs couches d'enrochements, plus ou moins jointifs. Dans certains cas, notamment lorsque le franchissement des poissons a été pris en compte lors de la conception de l'ouvrage, la pente du coursier peut être réduite et des gros blocs, plus ou moins uniformément répartis, ont pu être installés de manière à réduire les vitesses d'écoulement et offrir des zones de repos pour le poisson.

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

Figure

49



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

Exemples de seuils en enrochements dans les départements insulaires d'outre-mer.
(a) Seuil en enrochements en aval d'un seuil de prise (Captage du Bras des Lianes, La Réunion), (b) Seuil de stabilisation en enrochements liaisonnés (rivière des Galets, La Réunion), (c) Seuil en enrochements franchissable par conception pour certaines espèces, couplé à une passe à bassins (commune de Grand'Rivière, Martinique), (d) Écoulements sur la roche naturelle pouvant s'apparenter à un seuil en enrochements (Mayotte).

Problématiques hydrauliques et piscicoles

Comme pour un seuil à parement incliné (voir chapitre dédié aux seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150\%$), la vitesse de l'écoulement augmente progressivement de la crête de la rampe vers l'aval, jusqu'à ce que l'écoulement devienne uniforme, le tirant d'eau moyen restant alors à peu près constant tout au long du coursier. Plus le coursier est rugueux et le débit unitaire (q) faible, plus la longueur avant l'établissement du

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

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

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

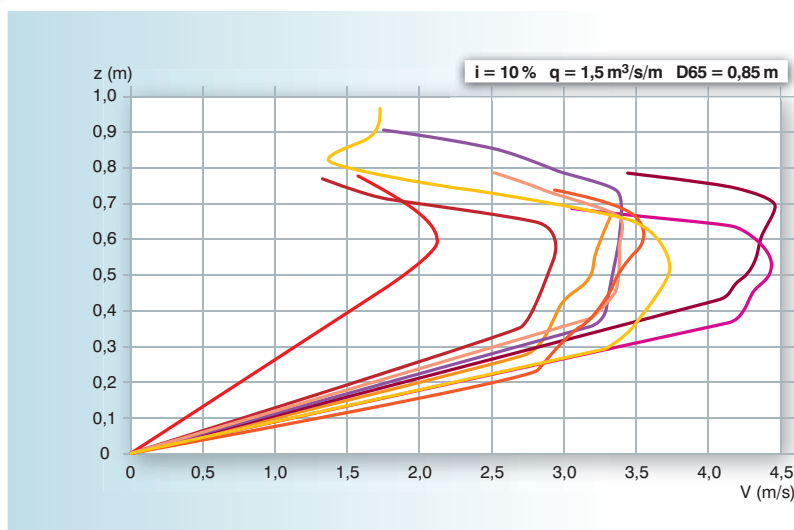
L'analyse des conditions hydrauliques au niveau des seuils en enrochements se révèle bien plus difficile que pour des seuils « classiques » étant donné la variabilité du mode d'organisation, des formes et des dimensions des blocs, d'autant plus que ces spécifications ne sont jamais très précises lors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

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

À titre d'illustration, la figure 50 présente des profils de vitesses mesurés pour un débit unitaire de 1,5 m³/s/m sur une rampe en enrochements ($D_{65} = 0,85$ m) de pente 10 % (Larinier *et al.*, 2006). Les différents profils présentés, relevés sur plusieurs verticales au droit d'une section à régime uniforme, mettent en évidence une variabilité spatiale importante des profils de vitesse (les valeurs maximales étant comprises entre 2,1 m/s et 3,7 m/s) ainsi qu'un très fort gradient de vitesse sur la verticale.

Figure

50



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

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

Deux facteurs sont limitants :

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

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

Souvent, les seuils en enrochements n'offrent pas vraiment de zones de repos aux poissons de grande taille, et leur franchissement doit donc s'effectuer d'une seule traite. Les blocs les plus protubérants peuvent éventuellement offrir des zones de repos aux plus petites espèces, à condition que l'agitation et la turbulence ne soient pas trop fortes (Figure 51).

Figure 51



a, b © M. Larinier (Pôle Ecohydraulique)

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

Un diagnostic difficile

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

Comme signalé précédemment, la **modélisation mathématique n'est pas pertinente**. Les lois d'hydraulique empiriques ne sont en effet pas applicables et il est difficile de définir des valeurs moyennes pour les paramètres comme la vitesse ou le tirant d'eau (valeurs moyennes qui, par ailleurs, ne seraient pas représentatives des conditions hydrauliques locales et n'auraient pas un grand intérêt pour une analyse précise des conditions de franchissabilité).

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

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

Enfin, les mesures sur le terrain demeurent possibles dans certains cas, mais sont souvent très chronophages et peuvent présenter des risques pour les opérateurs. Elles ne peuvent généralement pas être effectuées en conditions de débits moyens et forts.



Critères et classes de franchissabilité

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

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

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

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

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

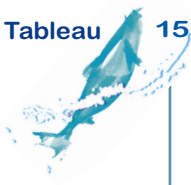
Au vu de l'hétérogénéité des écoulements, nettement marquée sur les seuils en enrochements, il est proposé ici de vérifier l'existence d'une voie de passage potentielle sur le seuil. **Cette voie de passage devra présenter sur l'ensemble de son linéaire un tirant d'eau suffisant et minimal ($h_{\text{min enroch}}$)** permettant le passage par la nage de l'espèce considérée, sans zone de blocage (absence de ressauts hydrauliques ou de chutes brutales).

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

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

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

Tableau 15



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

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

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

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

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

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

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

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

avec :

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

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

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

l est la pente du seuil (en m/m).

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

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

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

Présence de redan

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

Comme pour les seuils « classiques », la présence d'un redan sur toute la longueur d'un seuil en enrochements, peut singulièrement dégrader les conditions de franchissement piscicole (Figure 52).

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



Figure 52



© B. Voegtli (Ecogea)

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

N.B. Certains obstacles peuvent être considérés soit comme des seuils en enrochements équipés d'un redan important à l'amont (comme celui présenté en Figure 52), soit comme des seuils verticaux équipés d'une protection de pied.

L'analyse peut être abordée indifféremment soit à partir des seuils « classiques », soit à partir des seuils en enrochements, le résultat final concernant le degré de franchissabilité devant être similaire.

Pour ces obstacles mixtes, il est également possible de se référer au chapitre dédié aux ouvrages complexes.

Fosse aval

Hors épisode de crue, et contrairement aux seuils plus « classiques », l'énergie est dissipée progressivement sur le seuil de par la présence des enrochements.

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

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

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

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

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

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

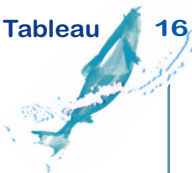


Tableau 16

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

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

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



Groupe ICE	Stade et/ou taille	Dimensions maximales des redans (m)		Valeurs seuils de chute (DH) pour le diagnostic de seuils en enrochements (m)											
				Pente ≤ 5 %				5% < Pente ≤ 7 %				7% < Pente ≤ 9 %			
				Classe ICE				Classe ICE				Classe ICE			
		a _{max}	c _{max}	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0
1a	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	0,10	0,10	∞	-	-	-	≤ 0,4	]0,4 - 1,5]	> 1,5	-	-	≤ 0,7	]0,7 - 1,8]	> 1,8
1b	Juvenile (Lp < 40 mm)	0,02	0,02	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0
2a	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	0,10	0,15	∞	-	-	-	∞	-	-	-	≤ 1,8	> 1,8	-	-
2b	Juvenile (Lp < 100 mm)	0,02	0,05	∞	-	-	-	≤ 1,0	]1,0 - 3,0]	> 3,0	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,1]	]1,1 - 1,8]	> 1,8
2c	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	0,10	0,20	∞	-	-	-	∞	-	-	-	≤ 1,1	> 1,1	-	-
2d	Juvenile (Lp < 100 mm)	0,02	0,05	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	≤ 0,7	]0,7 - 3,0]	> 3,0	-	≤ 0,3	> 0,3	-
3a	Lp > 500 mm	0,40	0,70	∞	-	-	-	≤ 1,0	]1,0 - 3,0]	> 3,0	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,1]	]1,1 - 1,8]	> 1,8
3b	100 mm < Lp < 500 mm	0,10	0,20	∞	-	-	-	≤ 0,4	]0,4 - 1,5]	> 1,5	-	-	≤ 0,7	]0,7 - 1,8]	> 1,8
3c	Lp < 100 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4a	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	0,05	0,10	∞	-	-	-	≤ 1,0	> 1,0	-	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,9]	> 1,9	-
4b	Juvenile (Lp < 40 mm)	0,02	0,02	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0

Tableau 17 Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité des seuils en enrochements (pour des pentes moyennes de seuil > 9 %)

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

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

Groupe ICE	Stade et/ou taille	Dimensions maximales des redans (m)		Valeurs seuils de chute (DH) pour le diagnostic de seuils en enrochements (m)												
				9 % < Pente ≤ 11 %				11 % < Pente ≤ 13 %				13 % < Pente ≤ 15 %				Pente > 15 %
				Classe ICE				Classe ICE				Classe ICE				Classe ICE
		a _{max}	c _{max}	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0	0
1a	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	0,10	0,10	-	≤ 0,3	]0,3 - 1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
1b	Juvenile (Lp < 40 mm)	0,02	0,02	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	> 0,0
2a	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	0,10	0,15	≤ 1,0	]1,0 - 4,0]	> 4,0	-	≤ 0,5	]0,5 - 2,4]	> 2,4	-	-	≤ 0,9	]0,9 - 3,4]	> 3,4	> 0,0
2b	Juvenile (Lp < 100 mm)	0,02	0,05	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
2c	Subadulte / Adulte (Lp > 100 mm)	0,10	0,20	≤ 0,5	]0,5 - 3,2]	> 3,2	-	-	≤ 2,2	> 2,2	-	-	≤ 0,6	]0,6 - 3,3]	> 3,3	> 0,0
2d	Juvenile (Lp < 100 mm)	0,02	0,05	-	-	≤ 0,5	> 0,5	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	> 0,0
3a	Lp > 500 mm	0,40	0,70	-	≤ 0,5	]0,5 - 1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
3b	100 mm < Lp < 500 mm	0,10	0,20	-	≤ 0,3	]0,3 - 1,0]	> 1,0	-	-	≤ 0,4	> 0,4	-	-	-	> 0,0	> 0,0
3c	Lp < 100 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4a	Subadulte / Adulte (Lp > 40 mm)	0,05	0,10	-	≤ 1,4	]1,4 - 4,0]	> 4,0	-	≤ 0,6	]0,6 - 2,4]	> 2,4	-	-	≤ 0,9	> 0,9	> 0,0
4b	Juvenile (Lp < 40 mm)	0,02	0,02	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	-	-	-	> 0,0	> 0,0

■ Arbre décisionnel

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

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

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

Si aucune voie de passage continue de ce type n'existe (obligation pour le poisson de rencontrer des portions de rampe où $h < h_{\min \text{ enroch}}$), l'obstacle peut être considéré, dans ces conditions hydrologiques, comme une barrière totale au sens d'ICE (Classe ICE = 0). *Il convient toutefois de poursuivre l'analyse (aller en 2) afin d'apprécier la classe de franchissabilité dans le cas où des conditions hydrologiques différentes permettraient d'assurer un tirant d'eau suffisant. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site dans d'autres conditions hydrologiques.*

2. Analyse des redans

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

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

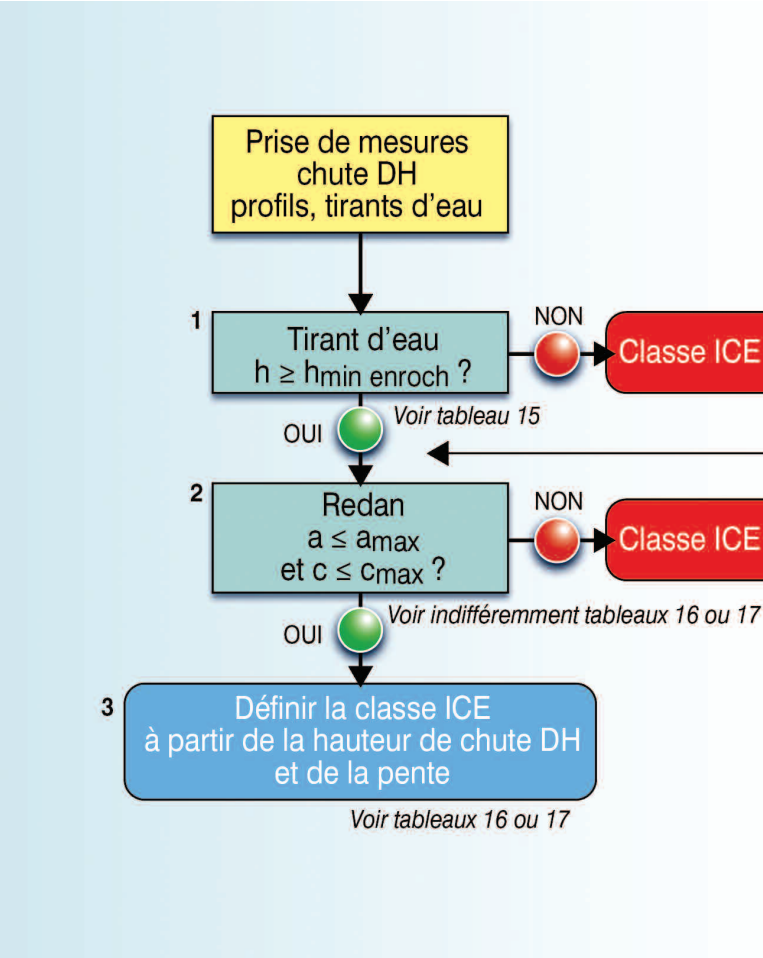
Si les dimensions (a et c) de chaque redan sont inférieures aux valeurs seuils ($a_{\max}$ et $c_{\max}$, tableaux 16 et 17), aller en 3.

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

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



Figure 53



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



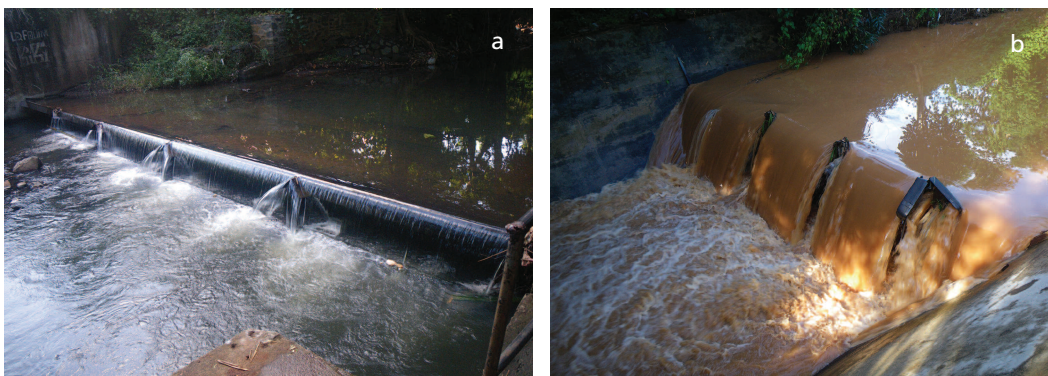
Cas des éléments mobiles associés à un ouvrage

Écoulements par surverse

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

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

Figure 54



Écoulements au-dessus d'organes mobiles.

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

a, b © B. Voegtli (Ecogea)

Écoulements par sousverse

Critères de franchissabilité

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

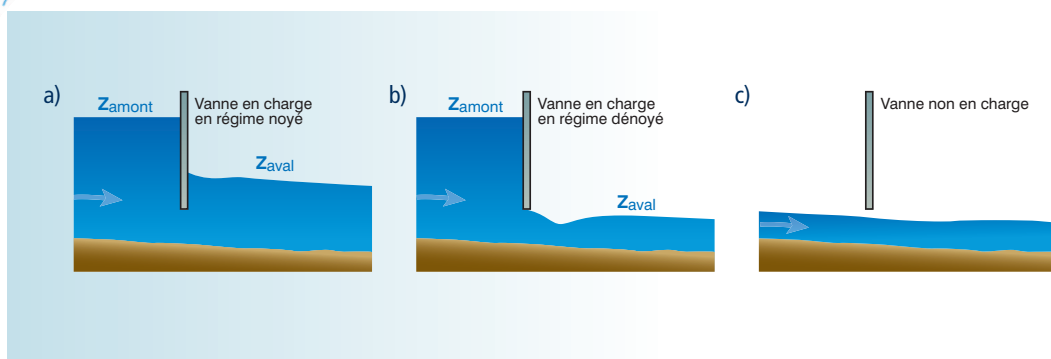


■ Les différents types d'écoulements sous des organes mobiles

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

Lorsque la vanne n'est pas en charge (Figure 55c), c'est à dire que le niveau d'eau en amont de la vanne (Z_{amont}) est au-dessous de la cote basse de la vanne, il n'y a plus de mise en vitesse de l'écoulement, comme dans le cas d'une vanne en charge. L'écoulement est alors à surface libre et l'analyse de la franchissabilité est identique à celle pratiquée pour un seuil à parement incliné.

Figure 55



© Graphies pour AFB

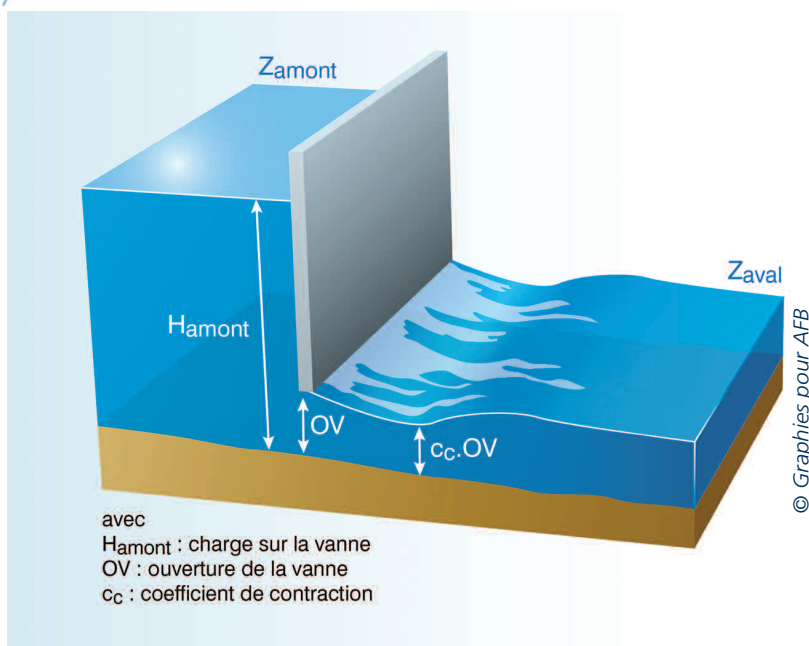
Schémas de vannes en charge et non en charge. D'après Baudoin et al., 2014.

■ Écoulements en charge noyés ou dénoyés

Écoulement dénoyé

Dans le cas d'un écoulement en régime dénoyé (Figure 56), le niveau d'eau en aval de la vanne est globalement inférieur à la cote altimétrique du pied de la vanne. Le jet créé par l'écoulement passe sous la vanne dans une section S , et est accéléré jusqu'à une section contractée S_c , où la vitesse d'écoulement est maximale (V_{max}) et voisine de : $V_{\text{max}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\text{amont}}}$

Figure 56



© Graphies pour AFB

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

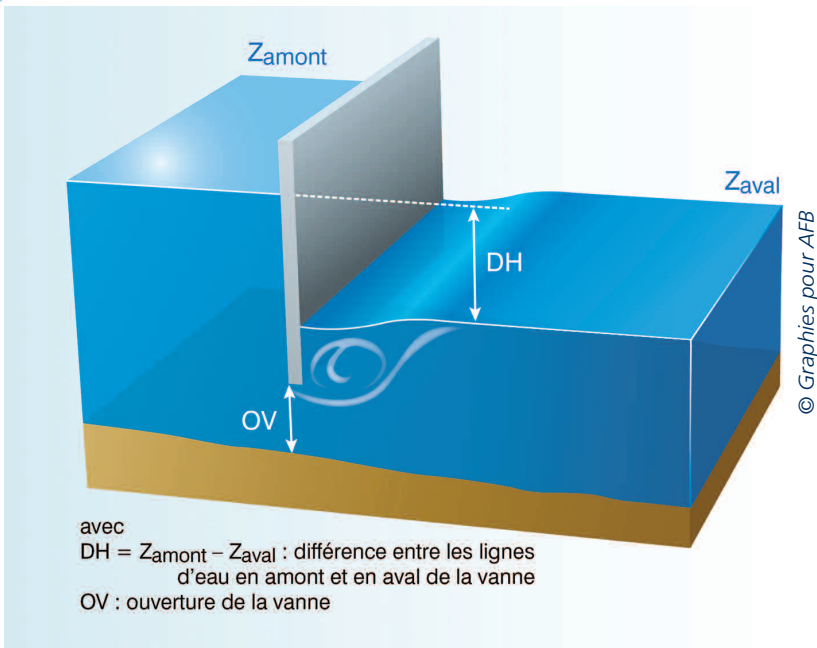
Dans le cadre de la méthode ICE, cette vitesse maximale sera confrontée aux capacités de nage des espèces ou groupes d'espèces ciblées.

Écoulement noyé

A contrario, dans le cas d'un écoulement en régime noyé (Figure 57), le niveau d'eau en aval de la vanne est supérieur à la cote altimétrique du pied de la vanne. Dans ce cas, le niveau aval influence l'écoulement en amont et la différence des niveaux d'eau de part et d'autre de la vanne est à prendre en compte pour apprécier les conditions d'écoulement au niveau de l'ouvrage.

Figure

57



avec
DH = $Z_{\text{amont}} - Z_{\text{aval}}$: différence entre les lignes
d'eau en amont et en aval de la vanne
OV : ouverture de la vanne

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

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

■ Définitions des classes de franchissabilité

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

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

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

■ si le dénivelé DH (ou H_{amont} dans le cas d'une vanne dénoyée) induit des vitesses d'écoulement V inférieures à la vitesse de sprint U_{max} associée à la taille minimale L_{min} des poissons du sous-groupe considéré, l'obstacle peut être considéré comme une **barrière à impact limité (Classe ICE = 1)** ;

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

Section d'ouverture

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

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

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

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associés à l'arbre décisionnel

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

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

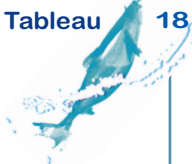


Tableau 18 Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité d'écoulements sous organes mobiles ou par des orifices de fond

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

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



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

■ Arbre décisionnel

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

1. Analyse de l'ouverture de vanne

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

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

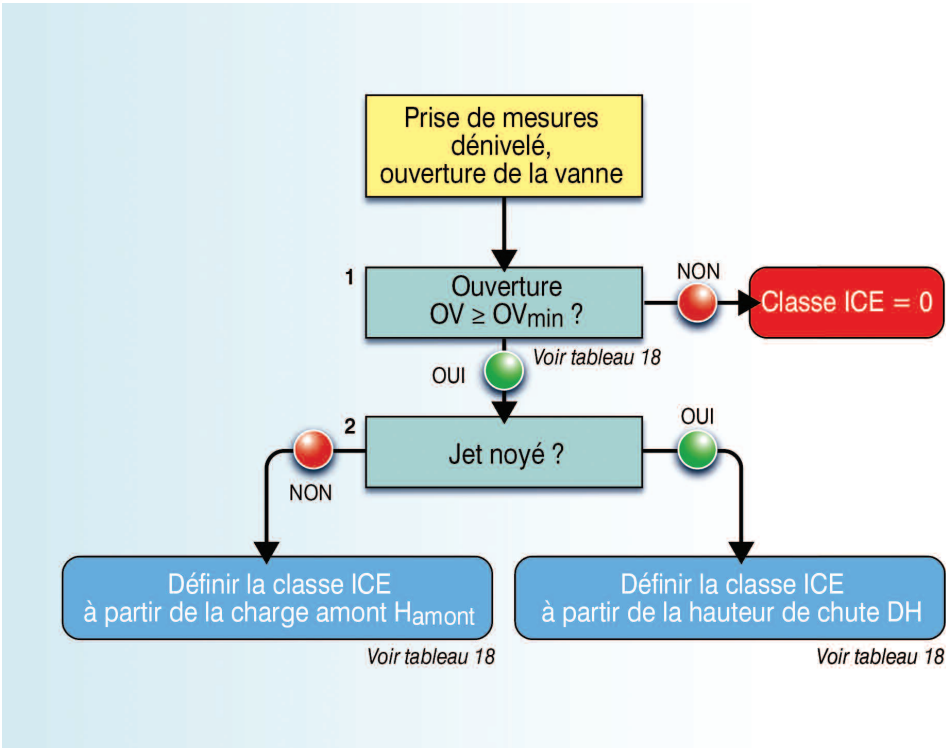
2. Analyse du dénivelé DH (jets noyés) ou de la charge amont H_{amont} (jets dénoyés)

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

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

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

Figure 58



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



Cas des ouvrages routiers ou ferroviaires

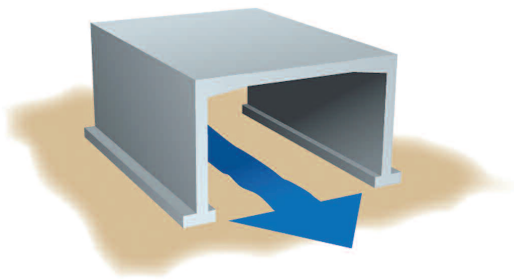
Les différents types d'ouvrages

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

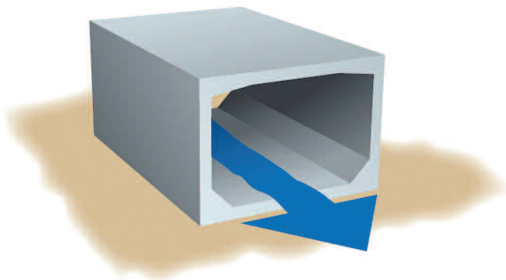
En se substituant localement au milieu naturel, ces ouvrages modifient généralement le substrat (cas notamment des PICF), les conditions d'éclairement et les conditions hydrauliques locales.

Figure 59

Passage inférieur en portique ouvert (PIPO)



Passage inférieur en cadre fermé (PICF)



© Graphies pour AFB



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

Exemples de différents types d'ouvrages.

Les principales causes pouvant limiter le franchissement

Les ouvrages de franchissement routiers peuvent constituer des obstacles sérieux à la migration des poissons vers l'amont. Les principaux facteurs susceptibles de limiter le franchissement piscicole sont décrits ci-après.

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

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

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

Figure 60



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

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

■ Des tirants d'eau trop faibles

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

Plus rarement, il arrive que la largeur de l'ouvrage soit surdimensionnée par rapport à la largeur du cours d'eau sur le secteur. Lorsque le profil transversal du radier est horizontal, sans lit mineur ou chenal particulier, le tirant d'eau peut être très faible, même hors période d'étiage (Figure 61).

Figure 61



© B. Voegtli (Ecogea)

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

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

Le blocage du poisson peut également se produire à l’extrémité aval de l’ouvrage en raison de la présence d’une chute (Figure 62). Cela est très fréquent et résulte le plus souvent d’un mauvais calage de l’ouvrage par rapport au profil du cours d’eau. Cela peut aussi provenir de l’abaissement du fil d’eau en aval, consécutif à l’installation de l’ouvrage si aucune mesure préventive (seuil de contrôle) n’a été prise pour stabiliser le lit.

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

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

Figure 62



Exemples de chutes en aval d’ouvrages routiers.
(a) Pont de Ravine Chaude sur la Grande Rivière à Goyaves (Guadeloupe), (b) Rivière Blanche (Martinique),
(c) Radier Beauvallon sur la rivière des Roches (La Réunion), (d) Pont Baimbridge sur la Grande Rivière à Goyaves (Guadeloupe).

■ Un mauvais calage en tête

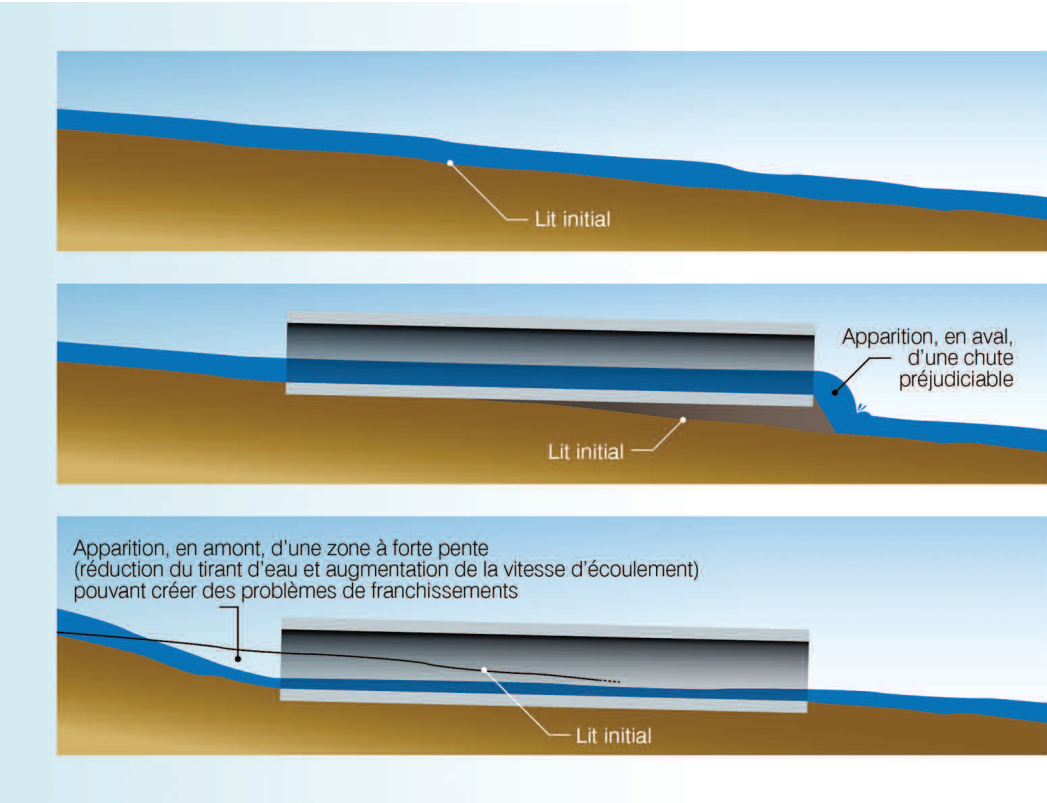
Plus rarement, un mauvais calage de la partie amont de l’ouvrage peut se traduire par l’existence, en amont immédiat, dans le lit du cours d’eau, d’une zone à forte vitesse et à faible tirant d’eau difficilement franchissable par les poissons (Figures 63 et 64).

Figure 63



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

Figure 64



© Graphies pour AFB

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

■ **L'accumulation de débris à l'entrée ou dans les ouvrages** représente aussi une fréquente cause de blocage pour les migrateurs (Figure 65). C'est notamment le cas lorsque les ouvrages sont sous-dimensionnés par rapport à la largeur du cours d'eau (fort rétrécissement de la section d'écoulement) et lorsque le tirant d'air entre la ligne d'eau et la tête de l'ouvrage hydraulique est insuffisant.

Figure 65



a, b © B. Voegtli (Ecogea)

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

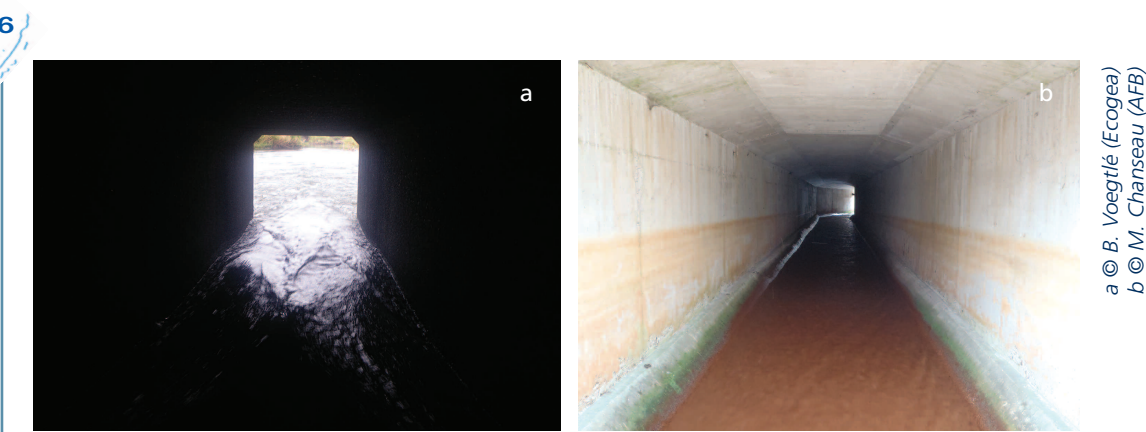
■ **Le changement brusque d'intensité lumineuse**

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

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

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

Figure 66



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

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

Principe de l'évaluation

Comme pour les autres types d'obstacles, l'évaluation de la franchissabilité de l'ouvrage consiste à relever les différents facteurs susceptibles de limiter le déplacement des différentes espèces ou groupes d'espèces. Les facteurs les plus importants sont le couple vitesse / distance à franchir, le tirant d'eau et les chutes ou redans au sein de ou en pied d'ouvrage.

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

Ces ouvrages, contrairement aux seuils, sont généralement caractérisés par des pentes modérées (au maximum de quelques pourcents) mais présentent des longueurs qui peuvent s'avérer importantes.

La distance maximale franchissable pour une espèce donnée dépend de la vitesse d'écoulement dans l'ouvrage, qui est elle-même fortement liée à la forme de l'ouvrage, sa rugosité, sa pente et son débit d'alimentation.

L'analyse de la franchissabilité peut s'effectuer d'une manière analogue à celle utilisée pour les seuils à parement aval incliné. Cette analyse portera ainsi sur la distance maximale franchissable par un poisson caractérisé par sa vitesse de nage (U) et son endurance correspondante (t_U) dans un écoulement de vitesse moyenne V .

Pour les ouvrages à pente relativement forte (plusieurs %), les poissons, en particulier les petites espèces, devront faire appel à leur vitesse de sprint (U_{max}) et les facteurs limitants seront les vitesses dans l'ouvrage et la longueur de celui-ci.

Pour les ouvrages présentant des pentes plus faibles, le poisson peut ne pas avoir à utiliser sa vitesse maximale de nage pour franchir l'obstacle. Il utilisera, à condition que la vitesse de l'écoulement dans l'ouvrage soit assez éloignée de sa vitesse de sprint, une vitesse de nage qui se situe dans le domaine des vitesses soutenues. C'est alors la longueur de l'ouvrage qui peut devenir le paramètre limitant (mais moins rapidement que dans le cas des ouvrages à pente plus forte).

■ Activité de nage utilisée par le poisson (de la vitesse de croisière au sprint)

La puissance musculaire maximale d'un poisson correspondant à la glycolyse anaérobie (P_{ana}) est proportionnelle à sa vitesse maximale U_{max} :

$$P_{ana} = k U_{max}^3$$

La puissance musculaire maximale correspondant à la glycolyse aérobie (P_{aer}) est celle correspondant à la vitesse limite (supérieure) de croisière U_{cr} avant le passage en anaérobie :

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

D'après Bell (1986), l'énergie (puissance x temps) musculaire anaérobie (W_{ana}) dépensée lors de la nage à vitesse maximale est donc :

$$W_{ana} = P_{ana} \cdot t_{Umax} = k \cdot U_{max}^3 \cdot t_{Umax}$$

Dans un régime de nage à la vitesse U en régime semi aérobie-anaérobie, c'est-à-dire lorsque U est comprise entre U_{max} et U_{cr} , la puissance musculaire développée est la suivante :

$$P = k U^3$$

La puissance anaérobie développée peut donc s'écrire :

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

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

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

On a donc

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

Soit

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

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

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

D'après Videler (1993), la vitesse de croisière d'un poisson est globalement égale au tiers de sa vitesse maximale de nage ($U_{max} \approx 3 U_{cr}$). Aussi, la distance D maximale parcourue par poisson nageant à une vitesse U peut s'écrire également :

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

La distance maximale est parcourue pour $\delta D / \delta U = 0$, c'est-à-dire lorsque :

$$U / U_{cr} = 1 + 1,913 (V / U_{cr} - 1)^{0,72}$$

Pour une vitesse d'écoulement donnée, cette expression donne la vitesse de nage maximisant la distance parcourue.



Un premier maximum existe lorsque $V < U_{cr}$ et $U = U_{cr}$, la distance D étant évidemment infinie.

Si $V > 2/3 U_{max}$, l'optimum de la vitesse de nage devient très proche de U_{max} puisque $U > 0,95 U_{max}$

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

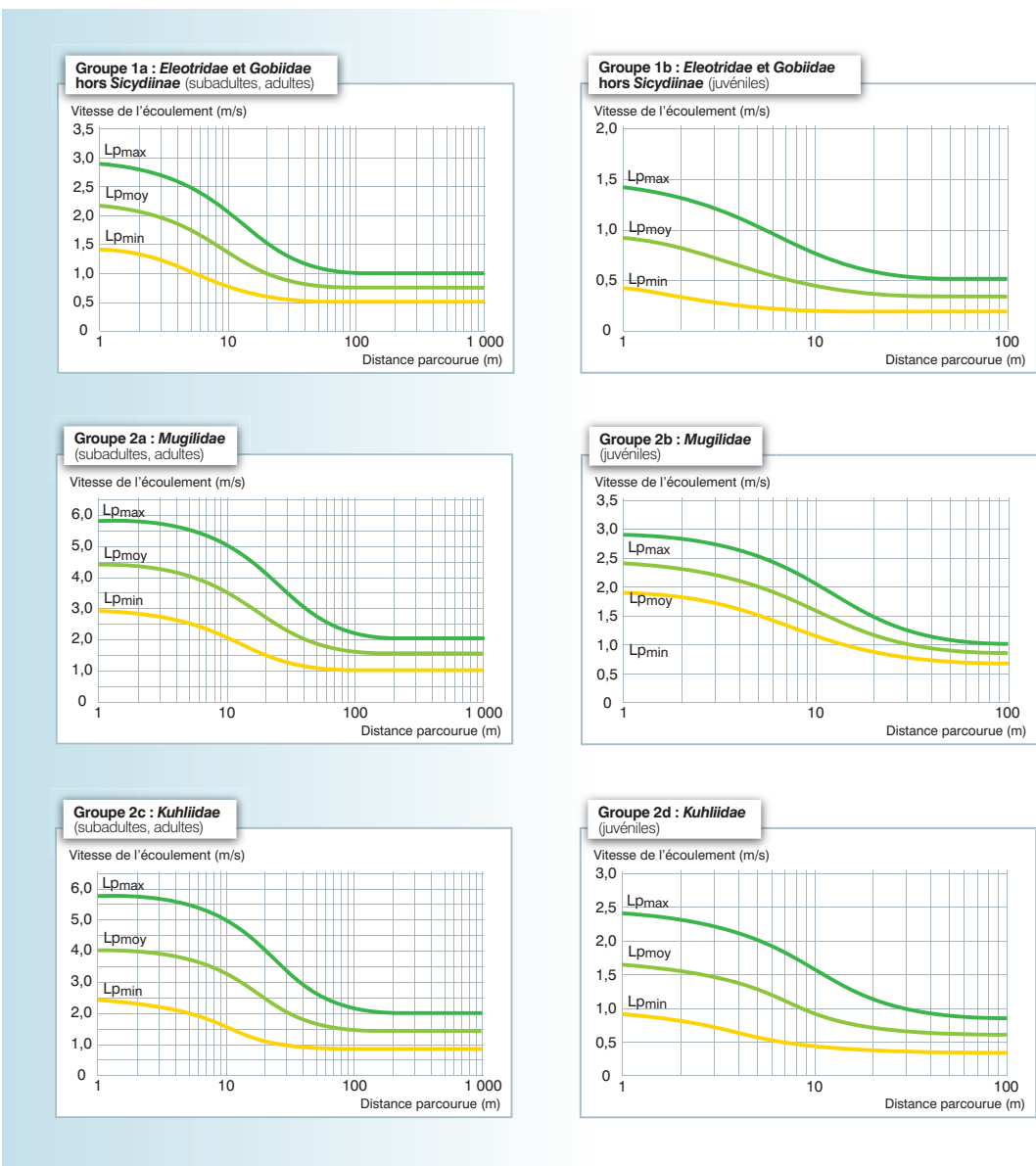
Lorsque la vitesse de l'écoulement devient supérieure aux $2/3$ de la vitesse maximale de nage, la distance franchie est maximale lorsque le poisson adopte sa vitesse maximale de nage.

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

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

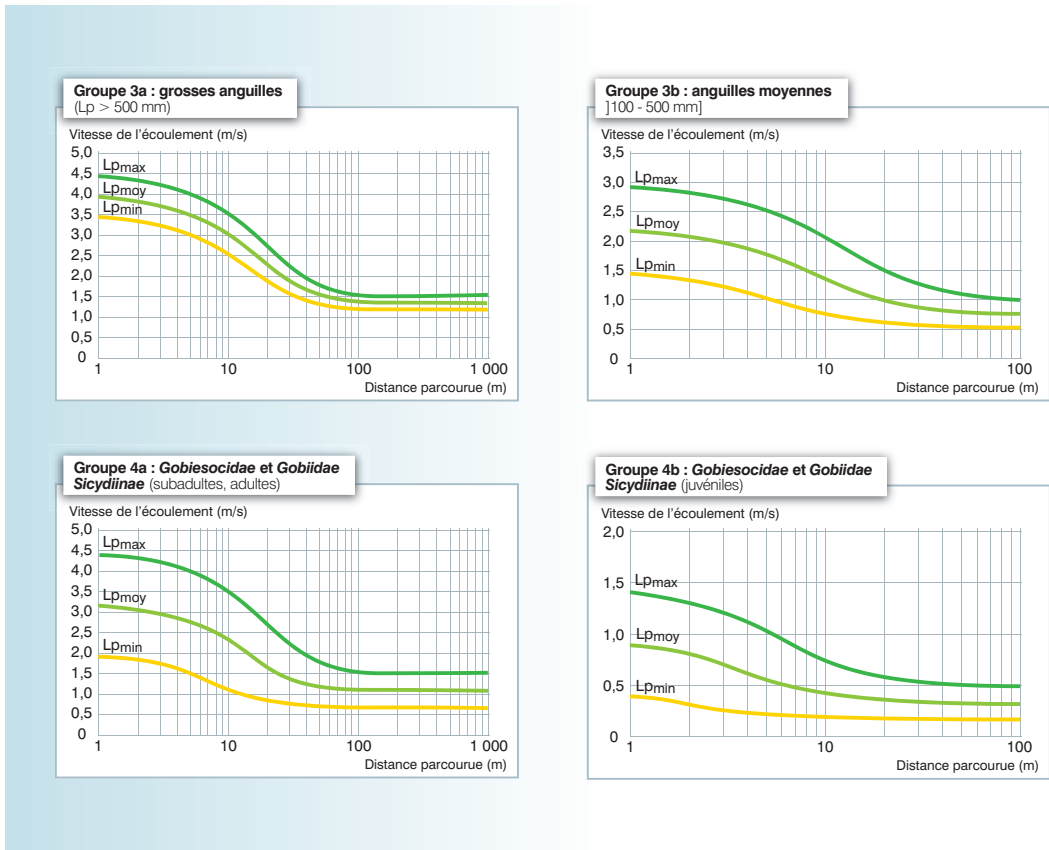
Pour chaque groupe ou sous-groupe d'espèces, les courbes vert foncé, vert clair et jaune correspondent respectivement aux individus de tailles maximale (L_{pmax}), moyenne (L_{pmoy}) et minimale (L_{pmin}).

Figure 67



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

Figure 68



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

Définition des classes de franchissabilité

Pour des seuils à parement aval incliné (voir chapitre dédié aux seuils à parement aval incliné de pente $\leq 150\%$), il est possible, pour chaque espèce ou groupe d'espèces, de définir des classes de franchissabilité (0 ; 0,33 ; 0,66 et 1) en fonction de la hauteur de chute DH.

Pour les ouvrages routiers, les analyses hydrauliques montrent qu'à partir d'une certaine valeur de pente et d'une certaine longueur à franchir (valeurs fonction de l'espèce ou du groupe d'espèces), tous les ouvrages constituent un obstacle plus ou moins sélectif. Par contre, en deçà des valeurs limitantes de pente et de longueur, il est impossible de déterminer la franchissabilité de l'ouvrage (Classe ICE = NC). Il convient alors de procéder à une analyse des vitesses dans l'ouvrage aux débits d'intérêt, soit par une modélisation hydraulique à l'aide d'un logiciel spécifique (*FishXing*, *Hec-Ras* ou similaires), soit plus simplement par des mesures des vitesses d'écoulement dans l'ouvrage. Ces mesures ne sont cependant pas toujours évidentes à effectuer, en particulier lorsque les dimensions de l'ouvrage ne permettent pas de pénétrer à l'intérieur.

Les courbes présentées (Figures 67 et 68) constituent les limites entre les classes de franchissabilité (0 ; 0,33 ; 0,66 et 1). Pour déterminer, pour un groupe d'espèces, les pentes limites franchissables pour une longueur d'ouvrage donnée, nous avons extrait, des abaques présentés précédemment, les vitesses d'écoulement limites (V_{max}) permettant le franchissement de l'ouvrage.

Les pentes donnant la valeur de cette vitesse d'écoulement pour des rugosités courantes d'ouvrages (coefficients de Manning $n = 0,01$ à $0,03$) et pour des débits unitaires variant de $0,05$ à $2 \text{ m}^2/\text{s}$ ont ensuite été calculées.

Puis, une analyse statistique sur les pentes a été effectuée, en vérifiant que le tirant d'eau est supérieur à la valeur minimale pour l'espèce considérée.

L'analyse a été effectuée pour des ouvrages de longueurs $L < 20 \text{ m}$, $20 < L < 50 \text{ m}$ et $50 \text{ m} < L < 100 \text{ m}$.

Présence d'une chute aval

De manière très fréquente, les passages busés ou ouvrages routiers présentent une chute à leur extrémité aval (Figure 69), pouvant limiter (voire bloquer) le franchissement des poissons.

La chute aval sera analysée sur le plan de sa franchissabilité piscicole suivant la même méthodologie que celle utilisée pour les seuils à parements verticaux ou quasi-verticaux. Dans un premier temps, la classe de franchissabilité de la chute sera donc établie à partir de l'arbre décisionnel et du tableau associé, proposés dans le chapitre dédié aux obstacles verticaux ou quasi-verticaux (pente $> 150 \%$).

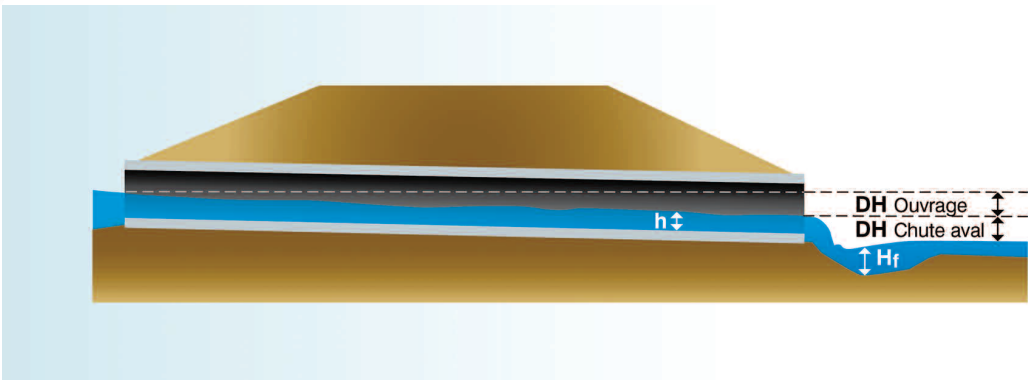
De manière à prendre en compte l'impact de la chute aval dans le diagnostic de franchissabilité de l'ouvrage, nous proposons d'adopter la même méthodologie que pour les ouvrages complexes ou mixtes (voir chapitre dédié à ce type d'ouvrages) ou les seuils inclinés présentant une chute aval (voir chapitre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

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

Présence d'un redan dans l'ouvrage

Comme pour les seuils, la présence d'un redan dans l'ouvrage peut singulièrement dégrader les conditions de franchissement, en particulier en condition de bas débit. Le degré de blocage est fonction du type d'écoulement induit par le ou les redans. Le cas le plus courant est le décrochement entre deux éléments successifs (buses ou dalots) constituant l'ouvrage.

Figure 69



© Graphies pour AFB

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

Tableau 19 Détermination de la classe de franchissabilité ICE globale d'un ouvrage de franchissement routier présentant une chute aval. D'après Baudoin et al., 2014

		Classe ICE de la chute aval			
		0	0,33	0,66	1
Classe ICE de l'ouvrage busé	0	0	0	0	0
	0,33	0	0	0,33	0,33
	0,66	0	0,33	0,33	0,66
	1	0	0,33	0,66	1
	NC	0	NC (≤ 0,33)	NC (≤ 0,66)	NC

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

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

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

Selon la dimension des ouvrages et en fonction du débit du cours d'eau, l'entrée de l'ouvrage peut se retrouver en charge, c'est-à-dire complètement noyé sous le niveau d'eau amont. Dans ce cas, l'ouvrage fonctionne comme un orifice de fond ou un ajutage et les vitesses au niveau de l'entrée amont sont beaucoup plus importantes que si l'écoulement était à surface libre.

Lorsque l'ouvrage est noyé en amont, cela signifie généralement que les passages hydrauliques sont de dimensions réduites (buse ou petit dalot) et ne permettent pas des mesures de vitesse et de tirants d'eau à l'intérieur.

L'appréciation de la franchissabilité de l'ouvrage devra alors passer soit par une appréciation de la vitesse maximale par une loi d'orifice (voir chapitre dédié aux écoulements sous vannes), **soit plus généralement par une modélisation hydraulique à l'aide d'un logiciel dédié** (*FishXing, Hec-Ras...*).

Dans d'autres cas, l'ouvrage peut être noyé partiellement par l'aval. Une prise de mesures de vitesses et de tirants d'eau en sortie hydraulique d'ouvrage n'est alors pas représentative des vitesses d'écoulement dans l'ouvrage.

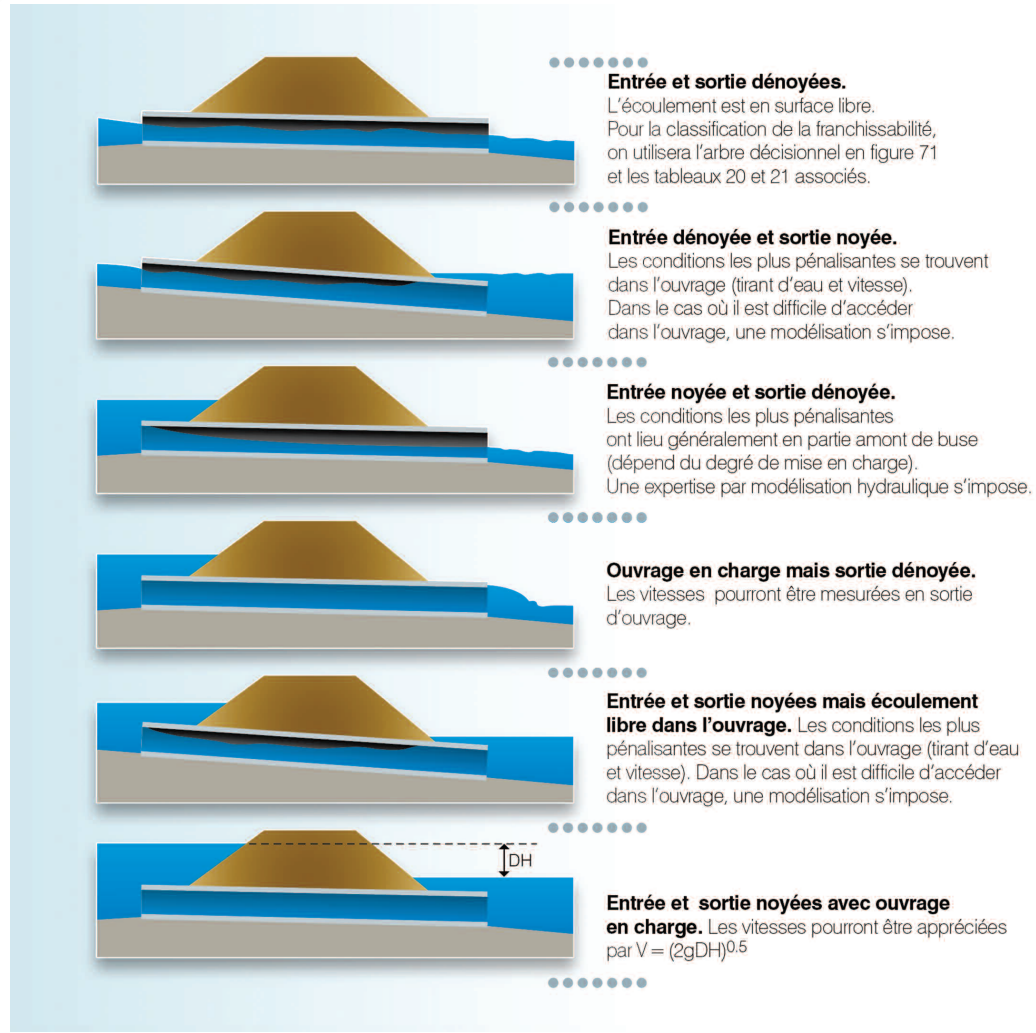
S'il s'avère impossible d'entrer dans l'ouvrage pour effectuer des mesures de vitesses, seule une modélisation hydraulique permettra d'apprécier les conditions hydrauliques rencontrées par le poisson sur tout le linéaire à franchir.

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



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

Figure 70



© Graphies pour AFB

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

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

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

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

Ces tableaux reprennent également les tirants d'eau minimums nécessaires (h_{min}) et les dimensions maximales (a_{max} et c_{max}) relatives à l'analyse des redans.

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



Tableau 20 Synthèse des valeurs seuils permettant de définir les classes de franchissabilité des ouvrages routiers ou passages busés par la nage, en fonction de leur pente et de leur longueur

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

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



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

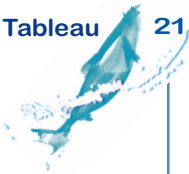


Tableau 21

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

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

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



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

■ Arbre décisionnel

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

1. Analyse de l'éventuelle chute aval

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

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

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

Si la chute aval n'est pas totalement infranchissable (Classe ICE > 0), poursuivre en 2.

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

Si le tirant d'eau dans l'ouvrage $h \geq h_{\min}$ (Tableaux 20 et 21 pages 128 à 131), alors le tirant d'eau est suffisant. Aller en 3.

Si $h < h_{\min}$, l'obstacle peut être considéré, dans ces conditions hydrologiques, comme une barrière totale au sens d'ICE (Classe ICE = 0). *Il convient toutefois de poursuivre l'analyse (aller en 3) afin d'apprécier la classe de franchissabilité dans le cas où des conditions hydrologiques différentes permettraient d'assurer un tirant d'eau suffisant. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse, il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site dans d'autres conditions hydrologiques.*

3. Analyse des redans dans l'ouvrage

Si le site ne présente pas de redans ou si les redans sont considérés comme négligeables ($h \geq 2a$), aller directement en 4.

Si une des dimensions (a ou c) d'un seul des redans présents dépasse la valeur maximale $a_{\max}$ ou $c_{\max}$ (Tableaux 20 et 21), alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

Si les dimensions (a, c) de chaque redan sont inférieures aux valeurs seuils ($a_{\max}$ ou $c_{\max}$, Tableaux 20 et 21), aller en 4.

4. Analyse de la pente de l'ouvrage

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

Si la classe ICE = NC, aller en 5.

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

5. Analyse des vitesses d'écoulement

À partir de la longueur de l'ouvrage ($L \leq 20$ m, $20 \text{ m} < L \leq 50$ m ou $L > 50$ m) et des vitesses d'écoulement mesurées ou estimées, puis du tableau 21, définir la classe de franchissabilité de l'ouvrage. Puis aller en 9.

Si les vitesses de l'écoulement ne peuvent pas être appréciées ou mesurées alors il ne sera pas possible de déterminer la franchissabilité (Classe ICE = NC). Puis aller en 9.

6. Analyse du noyage de l'ouvrage sous le terrain naturel

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

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

Sinon, aller en 7.



7. Analyse du noyage de l'ouvrage par l'aval

Regarder si l'ouvrage est noyé par le niveau d'eau aval sur toute sa longueur.

Si l'ouvrage est entièrement noyé par le niveau d'eau aval, aller en 8.

Sinon, aller en 2.

8. Analyse de la largeur de l'ouvrage

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

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

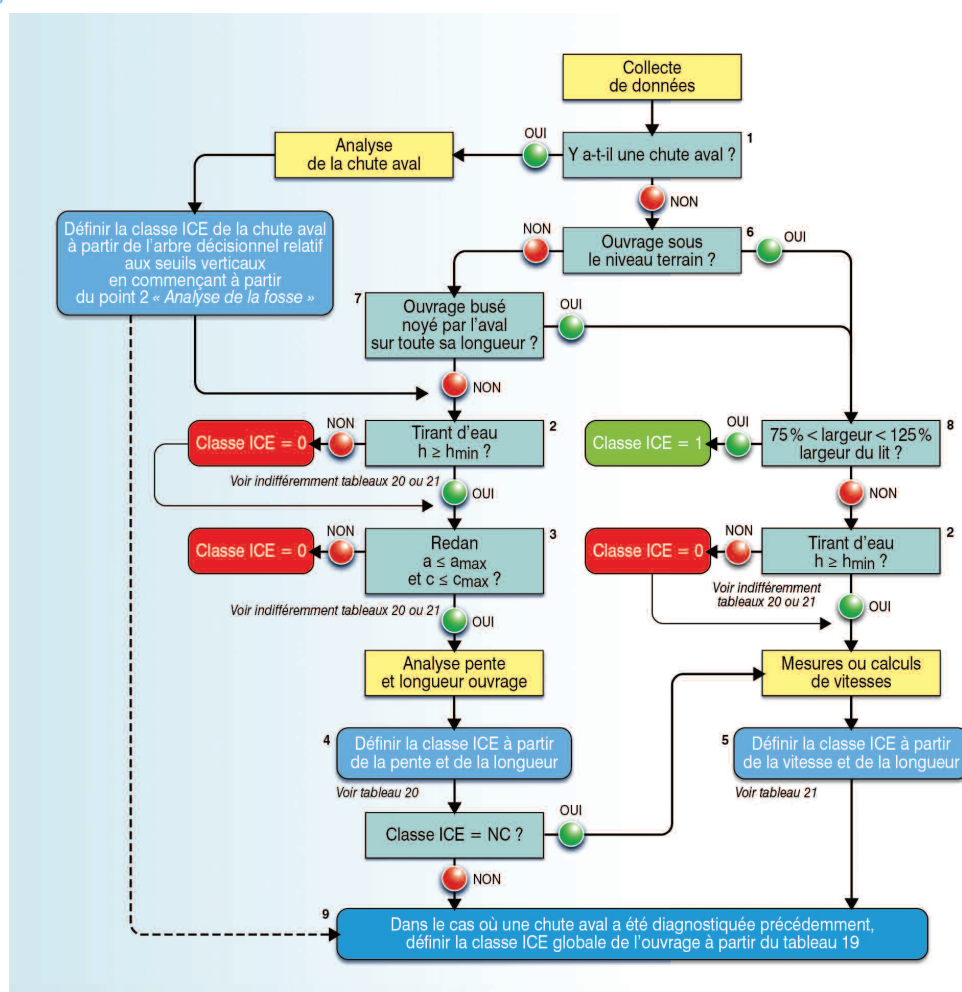
Sinon, vérifier que le point 2 ($h \geq h_{\min}$) est respecté, puis aller en 5. Si ce critère ($h \geq h_{\min}$) n'est pas respecté, alors l'obstacle peut être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

9. Analyse de la franchissabilité globale de l'ouvrage

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

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

Figure 71



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



Cas des ouvrages complexes ou mixtes

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

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

La démarche peut être comparée, dans son principe, à celle développée pour les seuils à parements inclinés ou les passages routiers ou ferroviaires présentant une chute aval (voir chapitres dédiés à ces types d'ouvrages).

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

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

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

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

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

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

Dans de tels cas, le diagnostic devrait nécessiter en toute rigueur une analyse plus poussée, passant par une modélisation hydraulique permettant de décrire les conditions d'écoulement le long de l'ouvrage en fonction de l'hydrologie. Cette modélisation hydraulique impliquera la construction et le calage d'un modèle numérique à partir des données physiques de l'ouvrage général (géométrie précise de l'ouvrage, rugosités) et hydrauliques



(débits, conditions aux limites aval et amont en fonction des débits...). Dans un premier temps toutefois, il paraît judicieux d'effectuer l'analyse comme un ouvrage complexe. La classe de franchissabilité sera alors considérée comme une classe « maximale » (Classe ICE réelle de l'ouvrage $\leq$ Classe obtenue par décomposition) et, suivant la classe obtenue, il sera possible de déterminer l'utilité d'avoir recours à une modélisation hydraulique (voir également l'exemple de la figure 73).

Figure 72



a, b © P. Valade (Ocea Consult')

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

Figure 73



© B. Voegtlté (Ecogea)

Exemple d'ouvrage complexe ne pouvant pas être décomposé en plusieurs ouvrages « simples ».
Pour ce cas (c.-à-d. écoulements sous vanne en charge poursuivis par un seuil à parement incliné en aval), l'ouvrage ne peut pas être décomposé en deux ouvrages « simples ». La vitesse initiale en amont du seuil incliné est beaucoup plus importante (vitesse en sortie de vannage très forte) que dans le cas d'un seuil incliné classique sur lequel la mise en vitesse s'effectue progressivement. Cependant, une modélisation hydraulique s'avère inutile dans ce cas, puisque le passage sous la vanne est d'ores et déjà infranchissable. L'ouvrage peut donc globalement être considéré comme une barrière totale (Classe ICE = 0).

Définition des classes de franchissabilité de chacun des ouvrages individualisés

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

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

De manière à prendre en compte le cumul des impacts, il est proposé de dégrader la franchissabilité de l'ouvrage d'une à deux classes suivant les configurations.

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

Tableau

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

		Classe ICE de l'ouvrage aval				
		0	0,33	0,66	1	NC
Classe ICE de l'ouvrage amont	0	0	0	0	0	0
	0,33	0	0	0,33	0,33	NC (≤ 0,33)
	0,66	0	0,33	0,33	0,66	NC (≤ 0,66)
	1	0	0,33	0,66	1	NC
	NC	0	NC (≤ 0,33)	NC (≤ 0,66)	NC	NC

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

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

À titre d'exemples :

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



Le cas particulier de l'anguille

Approche spécifique

■ Généralités

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

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

■ Taille des individus et modes de franchissement

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

Les stades plus avancés présentent des capacités de nage supérieures à celles des civelles. Ces facultés leur permettent de franchir par la nage certains ouvrages de petite chute lorsque la reptation n'est pas possible.

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

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

■ Critères de franchissement

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

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

Cependant, le **diagnostic de la franchissabilité d'un ouvrage par les anguilles doit prendre en compte les capacités spécifiques de reptation des espèces (ou d' « escalade » pour les plus jeunes stades)**. Il est donc apparu nécessaire de définir des critères de franchissement spécifiques à ce mode de progression.

La méthode proposée pour l'outre-mer est similaire à celle présentée dans la méthodologie métropolitaine ; elle consiste dans un premier temps à vérifier l'existence d'une ou plusieurs voies de reptation potentielle pour le poisson, puis d'apprécier la franchissabilité de cette ou ces voies à partir de deux paramètres simples à mesurer ou à estimer : la distance à franchir et la pente de la voie de reptation analysée.

Existence d'une voie de passage par reptation

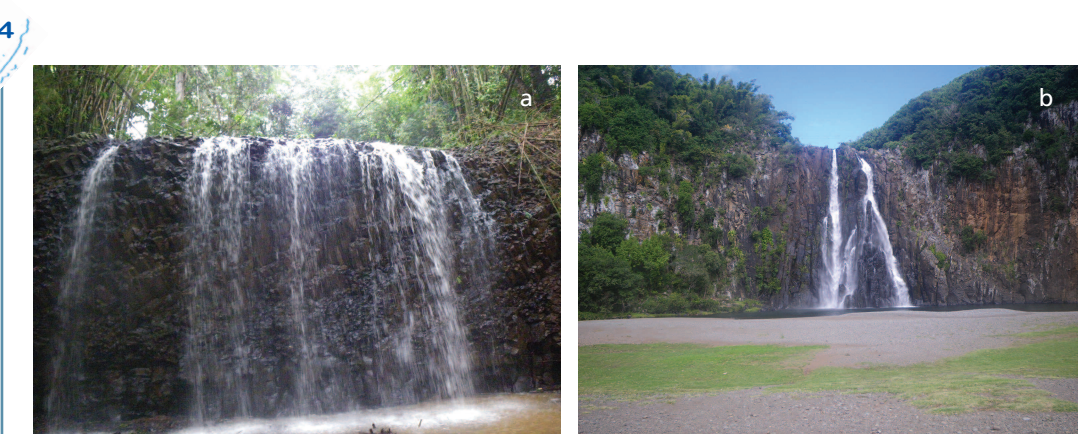
La présence de rugosités sur un substrat peut aider l'anguille à progresser, en particulier sur les fortes pentes. L'efficacité de ces éléments de rugosités dépend de leur taille dans plusieurs dimensions et de leur espacement dans différentes directions.

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

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

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

Figure 74



Exemples de chutes naturelles créant des zones potentielles de repos (anfractuosités) et assurant une certaine franchissabilité pour les civelles.
(a) Cascade Boungoumouhé (Mayotte), (b) Cascade Niagara (La Réunion).

a, b © B. Voegtli (Ecogea)

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

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

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

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

Figure 75



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

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

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

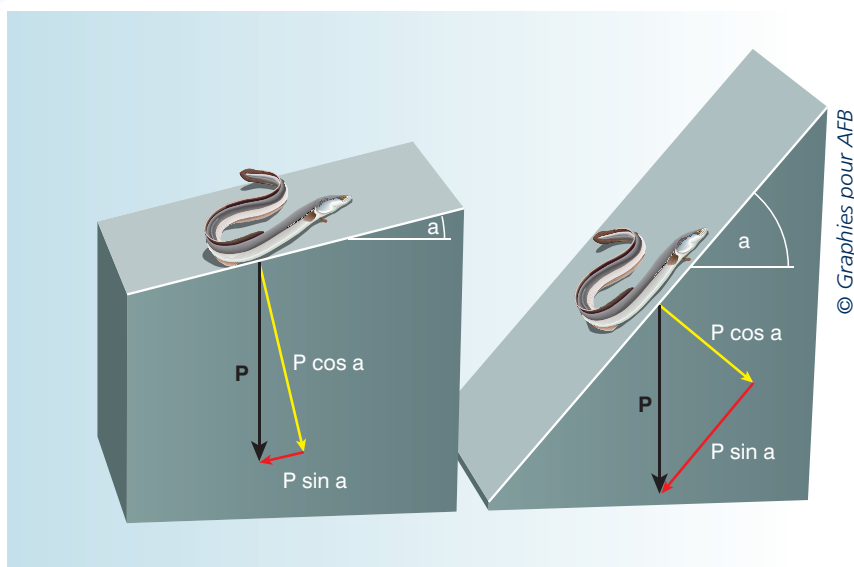
Pente

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

En considérant 'a' comme la pente du substrat (exprimée en unité d'angle, °), le poids du poisson peut être décomposé en une composante normale ($P \cos 'a'$) et une composante tangentielle ($P \sin 'a'$) (Figure 76). La part de son poids que l'anguille a à vaincre lors de la reptation est proportionnelle à $\sin 'a'$. La composante du poids qui vient s'ajouter à la tension superficielle pour plaquer l'anguille sur le substrat est proportionnelle à $\cos 'a'$ (Tableau 23).

Pour les pentes les plus faibles, inférieures ou égales à 20-30 % (ex : 15° dans Voegtli et Larinier, 2000), l'anguille est moins sensible aux défauts de rugosité ou aux augmentations de charge hydraulique. Elle n'a à vaincre qu'une faible fraction de son poids lorsqu'elle se déplace. Plus de 90 % de son poids lui sert à rester plaquée contre ces rugosités, et elle n'a pas à recourir à la tension superficielle (Figure 76). Cette gamme de faibles pentes correspond également à des conditions d'écoulement en nappe, au travers desquelles l'anguille peut éventuellement progresser plus rapidement en nageant, si la charge le permet.

Figure 76



© Graphies pour AFB

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

Avec l'augmentation de la pente, les anguilles auront de plus en plus d'efforts à fournir pour progresser. À partir de pentes de 100-175 % (45°-60°), les individus devront « tirer » une grosse partie de leur poids (70-90 %), alors qu'ils auront perdu 30 à 45 % de la composante du poids leur permettant de s'appuyer sur le substrat. Seule la tension superficielle peut alors les aider à se maintenir sur le substrat. Dans ces conditions, les plus petits individus sont favorisés. Des rugosités présentes sur la zone de reptation peuvent alors les aider à progresser. L'efficacité des rugosités dépend de leur taille dans plusieurs dimensions et de leur espacement dans différentes directions, en lien avec la taille des individus, qui doivent trouver suffisamment d'appuis pour progresser sans que ceux-ci soient trop resserrés.

La réduction de la pente augmente la tolérance de l'anguille à deux autres facteurs limitants, la rugosité de la surface de reptation et la charge hydraulique, qui ne peuvent généralement pas être mesurés précisément.

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

Tableau 23 Ordre de grandeur des paramètres favorables ($\cos 'a'$) et défavorable ($\sin 'a'$) au franchissement par reptation de l'anguille, en fonction de la pente de l'obstacle. D'après Baudoin et al., 2014

		Pente (% et équivalent en °)									
		14 %	32 %	48 %	100 %	130 %	173 %	230 %	300 %	500 %	∞
		8°	18°	26°	45°	53°	60°	66°	72°	79°	90°
cos a		0,99	0,95	0,90	0,70	0,60	0,50	0,40	0,31	0,20	0,00
sin a		0,14	0,31	0,43	0,70	0,80	0,87	0,91	0,95	0,98	1,00

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

Distance à franchir

De façon pragmatique, et en l'état actuel des connaissances, il a été considéré, comme pour le cas de l'anguille européenne dans la méthode ICE adaptée à la métropole, que plus la distance à franchir est importante plus la probabilité pour l'anguille de rencontrer des conditions de vitesses excessives, des charges inadaptées, des zones trop lisses ou des ruptures de pente incompatibles avec ses capacités de reptation augmente. De plus, l'individu se fatiguera d'autant plus vite que la pente sera importante.

Pour chaque stade biologique, il est ainsi proposé, sur la base de tableaux à double entrée, de déterminer la franchissabilité des ouvrages en croisant, pour ce qui concerne la voie de reptation potentielle, la longueur à franchir et la pente du parement.

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

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

Figure 77



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

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

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

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

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



Tableau 24 Classes de franchissabilité d’ouvrages présentant une zone de reptation pour le sous-groupe 3a (anguilles de longueur > 500 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 5	1	1	1	1	1	1	1
5 < P ≤ 12,5	1	1	1	1	1	0,66	0,66
12,5 < P ≤ 25	1	1	1	1	0,66	0,66	0,33
25 < P ≤ 50	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
50 < P ≤ 75	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0
75 < P ≤ 100	1	1	0,66	0,33	0,33	0	0
100 < P ≤ 150	1	0,66	0,33	0,33	0	0	0
150 < P ≤ 300	1	0,66	0,33	0	0	0	0
300 < P ≤ ∞	1	0,33	0	0	0	0	0

Tableau 25 Classes de franchissabilité d’ouvrages présentant une zone de reptation pour le sous-groupe 3b (anguilles de longueur comprise entre 100 et 500 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 5	1	1	1	1	1	1	1
5 < P ≤ 12,5	1	1	1	1	1	0,66	0,66
12,5 < P ≤ 25	1	1	1	1	0,66	0,66	0,33
25 < P ≤ 50	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
50 < P ≤ 75	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0
75 < P ≤ 100	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0	0
100 < P ≤ 150	1	0,66	0,33	0,33	0	0	0
150 < P ≤ 300	0,66	0,33	0,33	0	0	0	0
300 < P ≤ ∞	0,66	0,33	0	0	0	0	0

Tableau 26 Classes de franchissabilité d’ouvrages présentant une zone de reptation pour le sous-groupe 3c (civelles de longueur < 100 mm) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 5	1	1	1	1	1	1	1
5 < P ≤ 12,5	1	1	1	1	0,66	0,66	0,66
12,5 < P ≤ 25	1	1	1	1	0,66	0,66	0,66
25 < P ≤ 50	1	1	1	0,66	0,66	0,66	0,33
50 < P ≤ 75	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
75 < P ≤ 100	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33
100 < P ≤ 150	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0
150 < P ≤ 300	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0	0
300 < P ≤ ∞	0,66	0,66	0,66	0,33	0	0	0

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité d'un ouvrage par reptation pour l'anguille sont décrites ci-après.

1. Existence d'une voie de passage par reptation

Si existe une (ou plusieurs) voie(s) continue(s) à faible tirant d'eau (< 5 cm environ pour le sous-groupe 3a, < 2 cm environ pour le sous-groupe 3b et < 1 cm pour le sous-groupe 3c), alors effectuer un profil en long au niveau de cette (ces) voie(s) de passage potentielle(s) (ou uniquement de la voie potentielle qui paraît la plus favorable) et aller en 2.

Sinon, l'anguille est obligée d'utiliser ses capacités de nage ; aller directement en 3.

S'il n'est pas possible d'identifier une voie de passage, il peut être intéressant d'apprécier la franchissabilité pour des conditions hydrologiques plus favorables pouvant se traduire par l'apparition d'une voie de reptation. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse (aller en 2), il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site à des débits différents.

2. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par la reptation

Au préalable, définir la classe de franchissabilité ICE à partir de la longueur totale cumulée et de la pente moyenne de chacune des voies de reptation, en utilisant les tableaux 24 à 26 page 143.

Si la voie de reptation analysée est décomposée en plusieurs parties, déterminer la classe de franchissabilité ICE de chaque partie en utilisant également les tableaux 24 à 26. Si une ou plusieurs parties présente(nt) une classe de franchissabilité ICE plus faible que la classe obtenue lors de l'analyse globale de la voie, alors retenir la classe de la partie la plus déclassante.

S'il existe plusieurs voies de passage potentielles, faire le même exercice pour chaque voie et retenir, à l'échelle de l'ouvrage, la classe de franchissabilité ICE de la voie la moins déclassante.

Puis aller en 3.

3. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par la nage (en cas d'absence ou en complément de voie(s) de reptation existante(s))

Pour les stades anguilllette et anguille jaune, analyser la franchissabilité par la nage en utilisant les arbres décisionnels relatifs aux différents types d'ouvrages, selon la même méthodologie que pour les autres espèces piscicoles.

Pour le stade civelle, l'obstacle sera considéré comme une barrière totale (classe ICE = 0).

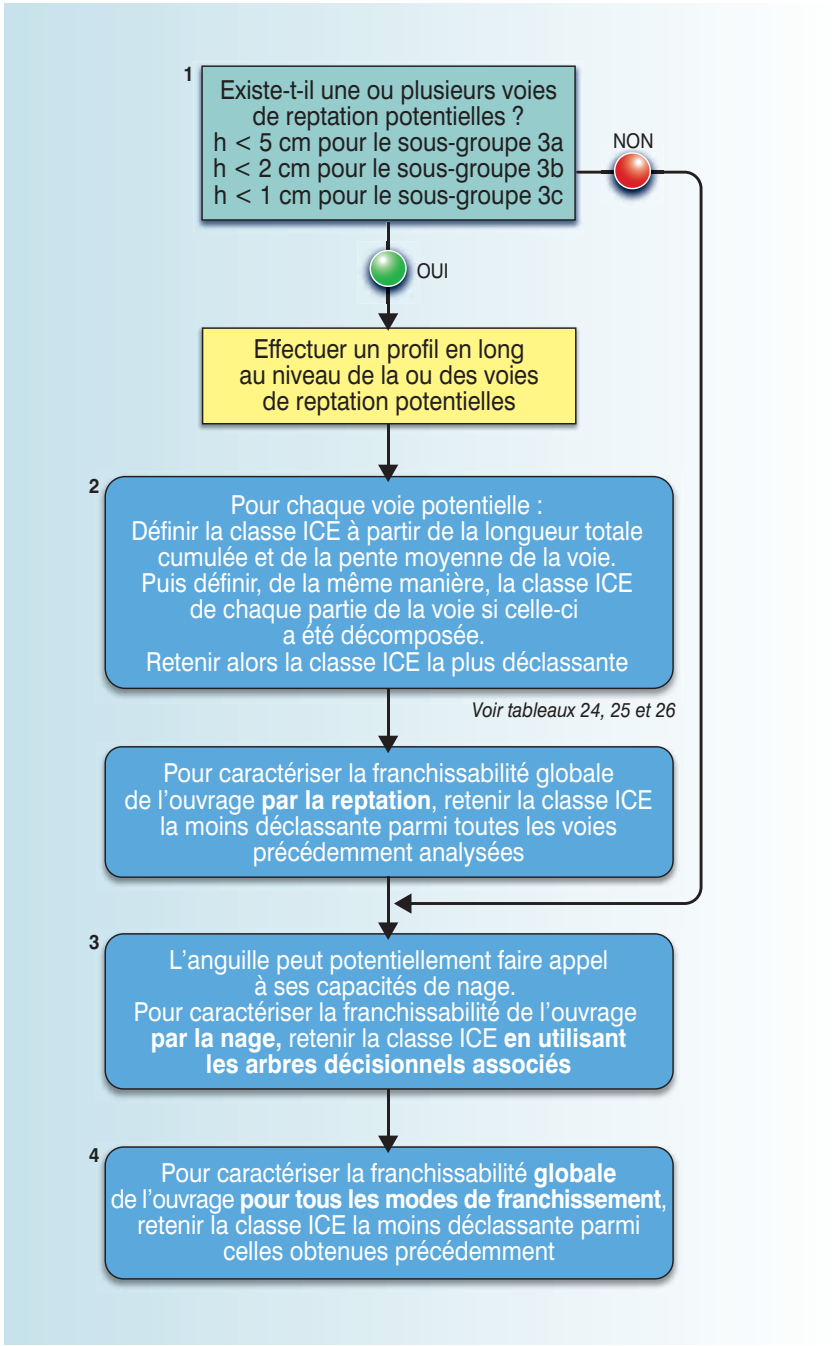
Aller en 4.

4. Détermination de la franchissabilité globale de l'ouvrage en prenant en compte l'ensemble des modes de franchissement

Retenir à l'échelle de l'ouvrage la classe de franchissabilité ICE la moins déclassante entre celle retenue pour le franchissement par la reptation (à l'issue du point 2) et celle(s) retenue(s) pour le franchissement par la nage (à l'issue du point 3).



Figure 78



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour le franchissement par reptation chez les anguilles.



Le cas particulier du ventousage et de l'escalade par les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques

Approche spécifique

■ Généralités

Les espèces de *Gobiidae Sicydiinae* (groupe 4), dont les nageoires ventrales sont soudées et forment une ventouse, peuvent utiliser cette ventouse pour franchir des parois abruptes, en s'aidant également de leur bouche et/ou de leurs nageoires pectorales.

Ce mode de progression par « ventousage » est majoritairement utilisé par ces espèces dès lors que le tirant d'eau ou les vitesses d'écoulement sont incompatibles avec leurs capacités de nage.

De plus, les stades post-larvaires et les juvéniles de petites espèces benthiques (sous-groupe 1b) sont capables d'utiliser les forces de tension superficielles pour franchir des obstacles sub-verticaux via la zone humide bordant le lit mouillé.

Au cours de leur croissance, comme pour l'anguille, le rapport poids / tension superficielle augmente, ce qui explique que, plus les individus sont petits, plus leur faculté à progresser sur des parois verticales est importante. C'est pourquoi, pour les espèces benthiques du groupe 1, seuls les post-larves et les juvéniles sont capables de progresser par « escalade ».

■ Taille et spécificités des individus

Pour prendre en compte les spécificités de chacun de ces stades et/ou groupes d'espèces, **trois sous-groupes ont été distingués** :

- **le sous-groupe 1b**, correspondant aux stades post-larvaires et juvéniles des petites espèces benthiques du groupe 1, c'est-à-dire aux *Eleotridae* et aux *Gobiidae* (hors *Sicydiinae*) ;
- **le sous-groupe 4a**, correspondant aux subadultes ou adultes de *Sicydiinae*. La taille des individus varie globalement de 40 à 150 mm ;
- **le sous-groupe 4b**, correspondant aux post-larves et juvéniles de *Sicydiinae*. La taille des individus varie, en fonction des espèces, de 15 à 40 mm.



■ Critères de franchissement

Des limites de classe de franchissabilité ont été définies, comme pour toutes les autres espèces, dans les tableaux associés aux différents arbres décisionnels (voir chapitres précédents dédiés à chaque type d'ouvrages).

Cependant, **le diagnostic de la franchissabilité d'un ouvrage pour ces 3 sous-groupes (1b, 4a et 4b) doit prendre en compte les capacités spécifiques de ventousage et d'escalade.** Il est donc apparu nécessaire de définir des critères de franchissement spécifiques à ces modes de progression.

La méthode proposée est relativement similaire à celle déclinée précédemment pour l'évaluation du franchissement par reptation des anguilles. Elle consiste dans un premier temps à vérifier l'existence d'une ou plusieurs voies de ventousage ou d'escalade potentielle(s) pour le poisson, puis d'apprécier la franchissabilité de cette (ces) voie(s) à partir de deux paramètres simples à mesurer ou à estimer : la distance à franchir et la pente de la voie de passage. Si la voie de ventousage et d'escalade est hétérogène (différentes pentes), les différentes parties devront être distinguées et analysées séparément.

Existence d'une voie de passage par ventousage et escalade

La présence de zones propices au repos des individus sur la voie de passage peut également aider fortement les individus. C'est pourquoi, à l'instar des jeunes stades d'anguilles, une part de la population peut franchir certaines chutes naturelles de fortes hauteurs (plusieurs dizaines de mètres), notamment lorsque celles-ci sont présentes en partie aval de cours d'eau et que la population migratoire est majoritairement constituée des plus jeunes stades (meilleures capacités de ventousage et d'escalade sur parois verticales pour les petits sujets, voir ci-après).

Il n'existe que très peu de données objectives sur les conditions de franchissement *in situ* des obstacles naturels et anthropiques par les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles des petites espèces benthiques, sachant que ces informations sont très difficiles à acquérir sans recours à des moyens logistiques et humains très lourds. Ceci est notamment dû à l'extrême variabilité des facteurs susceptibles d'influencer le franchissement d'un obstacle en milieu naturel : convergence d'un flux migratoire et de conditions hydrologiques favorables au franchissement de l'ouvrage, état physiologique des poissons, hétérogénéité de la configuration des obstacles à franchir, fortes hétérogénéités des conditions hydrauliques...

Toutefois les études sur pilote expérimental, menées notamment à La Réunion (Voegtli *et al.*, 2000 ; Lagarde *et al.*, 2016), montrent (*a minima* pour les *Sicydiinae*) notamment que :

- quelles que soient la pente et les conditions d'alimentation, le type de support semble avoir une influence modérée sur les capacités de franchissement, même si les poissons préfèrent clairement les surfaces plutôt lisses (roche naturelle, béton, acier) aux supports trop rugueux qui compliquent le ventousage ;
- la montaison est meilleure lorsque les poissons bénéficient d'un support juste humidifié (tirant d'eau très réduit) ;
- le pourcentage de réussite est d'autant plus faible que la pente est forte. En moyenne, 58 % des poissons sont montés à 50°, 45 % sont montés à 70° et seulement 20 % sont montés à 90°.

Une voie de ventousage et d'escalade se caractérise par la présence d'une zone continue à faible tirant d'eau (< 1 cm) entre l'aval et l'amont de l'ouvrage. Aussi, il est globalement possible de considérer que cette voie pour les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques est une voie de reptation potentielle pour les civelles et de marche pour les macro-crustacés (Figure 75 page 139).

Attention. En complément de leurs capacités de ventousage et d'escalade, les poissons peuvent utiliser également leurs seules capacités de nage pour franchir l'obstacle. Il conviendra alors, pour chacun des sous-groupes, de se rapporter aux arbres décisionnels définis précédemment (voir les chapitres précédents dédiés à chaque type d'ouvrages).

Pente

Sur la base, notamment, des résultats issus d'expérimentations menées sur des équipements pilotes (Voegtli *et al.*, 2002 ; Lagarde *et al.*, 2016), il a été considéré que la pente de la voie de ventousage et d'escalade potentielle constituait le principal critère à prendre en compte pour caractériser la franchissabilité potentielle d'un obstacle.

Comme pour l'anguille, pour les pentes les plus faibles ($\leq 20-30\%$), le poisson n'a à vaincre qu'une faible fraction de son poids lorsqu'il se déplace. Plus de 90 % de son poids lui sert à rester plaqué, ce qui fait qu'il n'a quasiment pas à recourir à la tension superficielle ou au ventousage (Figure 76 et Tableau 23 pages 140 et 141). Avec l'augmentation de la pente, les poissons auront de plus en plus d'efforts à fournir pour progresser. À partir de pentes de 100-175 % ($45^\circ-60^\circ$), les individus devront « tirer » une grosse partie de leur poids (70-90 %) alors qu'ils auront perdu 30 à 45 % de la composante du poids leur permettant de s'appuyer sur le substrat. Seule la tension superficielle et le ventousage peut alors les aider à se maintenir sur le substrat.

Dans ces conditions, les plus petits individus sont favorisés.

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

Distance à franchir

De façon pragmatique, et en l'état actuel des connaissances, il a été considéré, comme pour le cas de l'anguille, que plus la distance à franchir est importante plus la probabilité pour les poissons de rencontrer des conditions de vitesses excessives, des charges inadaptées, des ruptures de pente incompatibles avec leurs capacités d'escalade ou de ventousage augmente. De plus, l'individu se fatiguera d'autant plus vite que la pente sera importante.

Pour chaque sous-groupe, il est ainsi proposé, sur la base de tableaux à double entrée, de déterminer la franchissabilité des ouvrages en croisant, pour ce qui concerne la voie de ventousage et d'escalade potentielle, la longueur à franchir et la pente du parement.

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

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Les tableaux 27, 28 et 29 présentent les classes de franchissabilité en fonction de la pente et de la distance à franchir.

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 79 page 151), présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité d'un ouvrage donné.



Tableau 27

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie d'escalade pour le sous-groupe 1b (post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques, c'est-à-dire Eleotridae et Gobiidae hors Sicydiinae) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 75	1	1	1	1	1	0,66	0,66
75 < P ≤ 150	1	1	1	1	0,66	0,66	0,33
150 < P ≤ 300	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
300 < P ≤ 600	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0
600 < P ≤ ∞	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0	0

Tableau 28

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de ventousage pour le sous-groupe 4a (sub-adultes et adultes de Gobiidae Sicydiinae) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 75	1	1	1	1	1	1	0,66
75 < P ≤ 150	1	1	1	1	1	0,66	0,66
150 < P ≤ 300	1	1	1	1	0,66	0,66	0,33
300 < P ≤ 600	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
600 < P ≤ ∞	1	1	1	0,66	0,33	0,33	0,33

Tableau 29

Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de ventousage pour le sous-groupe 4b (post-larves et juvéniles de Gobiidae Sicydiinae) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 150	1	1	1	1	1	1	1
150 < P ≤ 300	1	1	1	1	1	1	0,66
300 < P ≤ 600	1	1	1	1	1	0,66	0,66
600 < P ≤ ∞	1	1	1	1	0,66	0,66	0,66



Certains ouvrages ou certaines chutes naturelles peuvent présenter des voies potentielles de passage en dévers ou surplomb plus ou moins prononcés. Dans certains cas de figure, et dès lors que le substrat reste encore humidifié, **il est possible que la voie de passage assure encore une certaine franchissabilité des individus (notamment dans le cas des *Sicydiinae*).** À l'heure actuelle, et au vu de la forte variabilité de configurations de dévers possible (pente du surplomb, présence de cassures franches...), il est difficile de pouvoir établir des critères simples pour définir le degré de franchissabilité de ces voies potentielles. **Dans ce cas, la définition de la classe de franchissabilité devra recourir à une expertise de la part de l'opérateur.**

■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité d'un ouvrage par le ventousage ou l'escalade pour les *Sicydiinae* ou les post-larves et juvéniles des petites espèces benthiques (sous-groupes 1b, 4a et 4b) sont décrites ci-après.

1. Existence d'une voie de passage par ventousage et escalade

S'il existe une (ou plusieurs) voie(s) continue(s) à faible tirant d'eau (< 1 cm environ), alors effectuer un profil en long au niveau de chacune de ces voies de passage potentielles (ou uniquement de la voie potentielle qui paraît la plus favorable) et aller en 2.

Sinon, les poissons sont obligés d'utiliser leurs capacités de nage ; aller directement en 3.

S'il n'est pas possible d'identifier une voie de passage, il peut être intéressant d'apprécier la franchissabilité pour des conditions hydrologiques plus favorables, pouvant se traduire par l'apparition d'une voie de ventousage et d'escalade. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse (aller en 2), il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site à des débits différents.

2. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par le ventousage et l'escalade

Au préalable, définir la classe de franchissabilité ICE à partir de la longueur totale cumulée et de la pente moyenne de chacune des voies de passage, en utilisant les tableaux 27 à 29 page 149.

Si la voie de ventousage et d'escalade analysée est décomposée en plusieurs parties, déterminer la classe de franchissabilité ICE de chaque partie en utilisant également les tableaux 27 à 29. Si une ou plusieurs parties présente(nt) une classe de franchissabilité plus faible que la classe obtenue lors de l'analyse globale de la voie, alors retenir la classe de la partie la plus déclassante.

S'il existe plusieurs voies de passage potentielles, faire le même exercice pour chaque voie et retenir à l'échelle de l'ouvrage, la classe de franchissabilité ICE de la voie la moins déclassante.

Puis aller en 3.

3. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par la nage (en cas d'absence ou en complément de voie(s) de ventousage et d'escalade existante(s))

Analyser la franchissabilité par la nage en utilisant les arbres décisionnels relatifs aux différents types d'ouvrages, selon la même méthodologie que pour les autres espèces piscicoles.

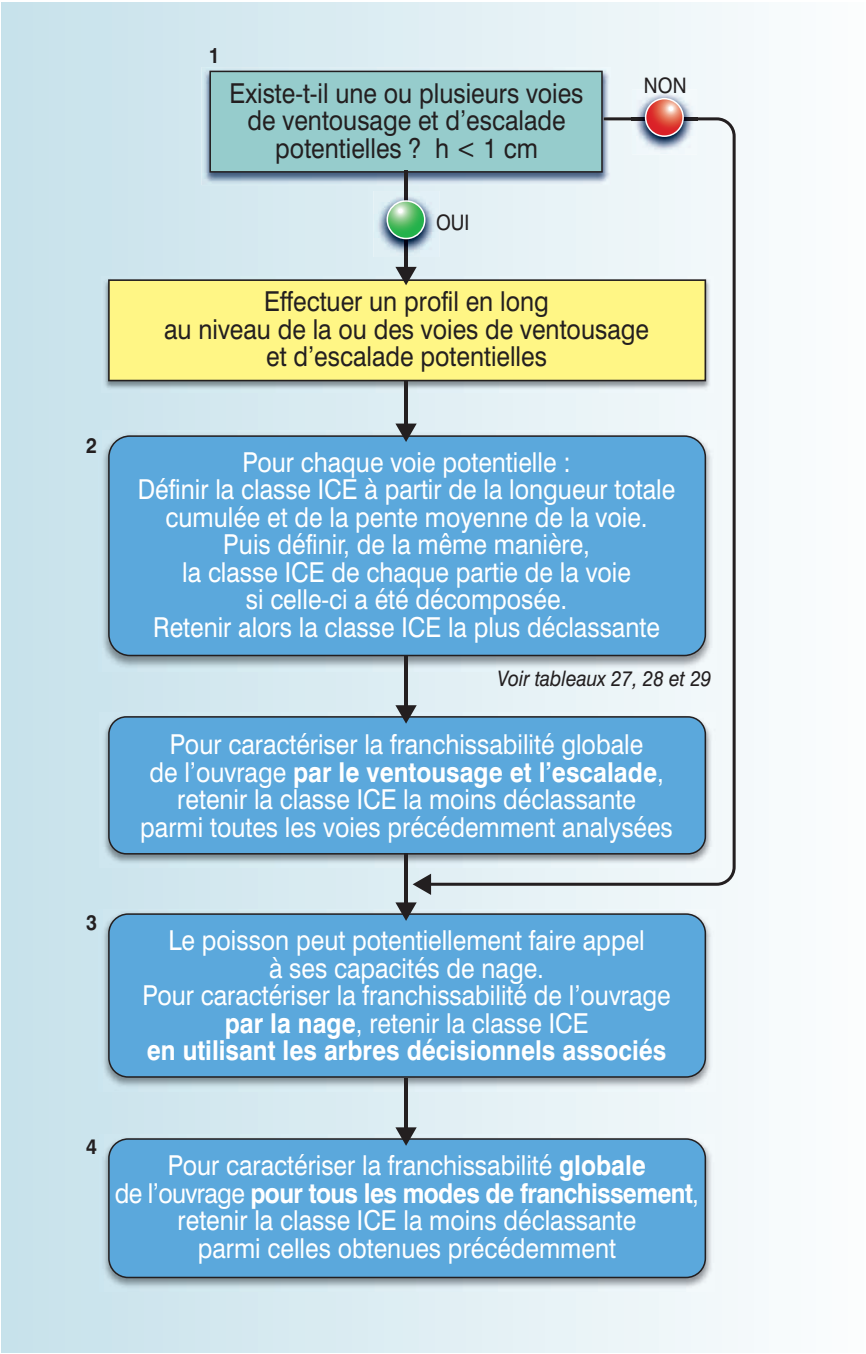
Aller en 4.

4. Détermination de la franchissabilité globale de l'ouvrage en prenant en compte l'ensemble des modes de franchissement

Retenir à l'échelle de l'ouvrage la classe de franchissabilité ICE la moins déclassante entre celle retenue pour le franchissement par le ventousage et l'escalade (à l'issue du point 2) et celle(s) retenue(s) pour le franchissement par la nage (à l'issue du point 3).



Figure 79



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour le franchissement par ventousage et escalade chez les Sicydiinae ou les post-larves et juvéniles de petites espèces benthiques.



Le cas particulier de la marche par les macro-crustacés

Approche spécifique

■ Généralités

Les macro-crustacés décapodes (groupe 5) ont de faibles capacités de nage ou de saut (hormis quelques cas particuliers comme *Xiphocaris elongata*).

En revanche, ils possèdent de très bonnes capacités de franchissement par marche, du fait des 5 paires de pattes (périopodes) dont ils disposent. Ce mode de progression est majoritairement utilisé par ces espèces dès lors que le tirant d'eau devient très faible ou que les vitesses d'écoulement deviennent fortes par rapport à leurs capacités de nage.

Il est donc pragmatique de considérer que ces espèces trouveront des conditions de franchissement plus favorables à leurs passages en bordure d'écoulements (vitesses d'écoulement et turbulences plus faibles) que dans les zones plus lotiques.

Les crustacés utilisent principalement 3 paires de pattes pour se déplacer : les périopodes P3, P4 et P5, mais peuvent également s'agripper avec les pinces terminales des périopodes P1. Cette technique de franchissement permet aux individus de petites tailles de franchir des parois humides verticales, voire en surplomb.

Pour les espèces du genre *Macrobrachium*, les relativement grandes tailles (et poids) des adultes peuvent diminuer leurs capacités de franchissement sur des parois verticales ou subverticales notamment, en comparaison aux capacités des juvéniles. En revanche, pour les petites espèces des familles des *Atyidae* ou des *Xiphocarididae*, du fait de la faible taille des individus adultes, les capacités de franchissement ne diminuent pas significativement lors de la croissance.

■ Spécificités des individus

Pour prendre en compte les spécificités de chacun de ces stades et/ou espèces, **deux sous-groupes ont été distingués** :

■ **le sous-groupe 5a**, correspondant aux adultes et subadultes des espèces du genre *Macrobrachium* et aux crabes d'eau douce amphidromes (*Grapsidae*). Ces individus possèdent de fortes capacités de franchissement sur des voies humides, mais seront limités par des parois verticales, notamment sur de longues distances ;

■ **le sous-groupe 5b**, correspondant aux espèces d'*Atyidae*, de *Xiphocarididae* (tous stades) ainsi qu'aux juvéniles du groupe 5a. Ces espèces et stades possèdent des capacités de franchissement supérieures au sous-groupe 5a pour le franchissement de paroi humides verticales, voire en surplomb.



■ Critères de franchissement

La méthode proposée est relativement similaire à celles déclinées précédemment pour les individus présentant des capacités spécifiques de reptation ou de ventousage / escalade.

Elle consiste dans un premier temps à vérifier l'existence d'une ou plusieurs voies de marche potentielle(s) pour les macro-crustacés, puis d'apprécier la franchissabilité de cette (ces) voies à partir de deux paramètres simples à mesurer ou à estimer : la distance à franchir et la pente de la voie(s) de passage. Si la voie de marche est hétérogène (différentes pentes), les différentes parties devront être distinguées et analysées séparément.

Existence d'une voie préférentielle de passage par marche

Il n'existe que très peu de données objectives sur les conditions de franchissement *in situ* des obstacles naturels et artificiels par les macro-crustacés, sachant que ces informations sont très difficiles à acquérir sans recours à des moyens logistiques et humains très lourds compte tenu de l'extrême variabilité des facteurs susceptibles d'influencer le franchissement d'un obstacle en milieu naturel : convergence d'un flux migratoire et de conditions hydrologiques favorables au franchissement de l'obstacle, état physiologique des individus, hétérogénéité de la géométrie des obstacles, hétérogénéité des conditions hydrauliques...

Malgré l'absence de données, les observations visuelles d'individus en progression (Voegtli et Valade, *obs. pers.*) **plaident pour caractériser une voie préférentielle de passage par marche comme une zone continue à faible tirant d'eau (< 1 cm) de l'aval à l'amont de l'ouvrage.** On peut donc globalement considérer que la voie de passage préférentielle par marche des macro-crustacés est similaire aux voies de ventousage et d'escalade ou de reptation des civelles (Figure 75 page 139).

N.B. Généralement, un obstacle anthropique génère des écoulements peu propices au franchissement direct par marche dans les veines principales d'écoulement (jet plongeant, écoulement à fortes vitesses), ce qui, par simplification, pousse couramment à caractériser la voie de passage préférentielle des décapodes par une voie (potentielle) de marche en bordure d'écoulement. **Toutefois, dans certains cas de figures** (seuil en enrochements entre deux murs bajoyers verticaux, contraction d'écoulement entre deux murs bajoyers...), **il peut être envisageable que des voies de passage dans des zones plus profondes puissent exister, à condition toutefois que les vitesses en fond restent modérées.** Au vu de l'état actuel des connaissances, l'existence, la caractérisation et le degré de franchissabilité de ces voies ne peuvent être définis que par expertise.

Pente

Sur la base notamment des résultats issus d'expérimentations menées sur des équipements pilotes (Voegtli *et al.*, 2002 ; Lagarde *et al.*, 2016), il a été considéré que la pente de la voie de marche constituait le principal critère à prendre en compte pour caractériser la franchissabilité potentielle d'un obstacle.

Comme l'anguille, pour les pentes les plus faibles (inférieures ou égales à 20-30 %), le crustacé n'a à vaincre qu'une faible fraction de son poids lorsqu'il se déplace (Figure 76 et Tableau 23 pages 140 et 141).

Avec l'augmentation de la pente, les crustacés auront de plus en plus d'efforts à fournir pour progresser (Hamano *et al.*, 1995 ; Fièvet, 1999b). À partir de pentes de 100-175 % (45°-60°), ils devront « tirer » une grosse partie de leur poids (70-90 %) alors qu'ils auront perdu 30 à 45 % de la composante du poids leur permettant de s'appuyer sur le substrat.

Dans ces conditions, les plus petits individus seront favorisés.

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

Distance à franchir

De façon pragmatique, et en l'état actuel des connaissances, il a été considéré comme pour le cas de l'anguille et des *Gobiidae*, que plus la distance à franchir est importante plus la probabilité pour les macro-crustacés de rencontrer des conditions de vitesses excessives, des charges inadaptées, des ruptures de pente incompatibles avec leurs capacités de marche augmente. De plus, l'individu se fatiguera d'autant plus vite que la pente sera importante.

Pour chaque sous-groupe, il est ainsi proposé, sur la base de tableaux à double entrée, de déterminer la franchissabilité des ouvrages en croisant, pour ce qui concerne la voie de marche potentielle, la longueur à franchir et la pente du parement.

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

Détermination des classes de franchissabilité

■ Valeurs seuils associées à l'arbre décisionnel

Les tableaux 30 et 31 présentent les classes de franchissabilité en fonction de la pente et de la distance à franchir.

Ces tableaux sont accompagnés d'un arbre décisionnel (Figure 80 page 156), présentant la méthode de détermination des classes de franchissabilité d'un ouvrage donné.

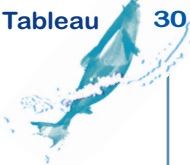


Tableau 30 Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de marche pour le sous-groupe 5a (*Grapsidae* et *Palaemonidae* adultes et subadultes) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 75	1	1	1	1	1	0,66	0,66
75 < P ≤ 150	1	1	1	1	0,66	0,66	0,33
150 < P ≤ 300	1	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33
300 < P ≤ 600	1	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33
600 < P ≤ ∞	1	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0

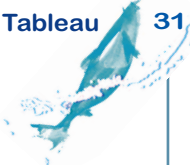


Tableau 31 Classes de franchissabilité d'ouvrages présentant une voie de marche pour le sous-groupe 5b (*Atyidae*, *Xiphocarididae* ainsi que les juvéniles de *Grapsidae* et *Palaemonidae*) en fonction de la pente et de la longueur de la voie de passage

Pente du coursier en %	Distance à franchir L (m)						
	L ≤ 0,5	0,5 < L ≤ 1	1 < L ≤ 2	2 < L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L > 20
P ≤ 75	1	1	1	1	1	1	1
75 < P ≤ 150	1	1	1	1	1	1	1
150 < P ≤ 300	1	1	1	1	1	1	1
300 < P ≤ 600	1	1	1	1	1	1	1
600 < P ≤ ∞	1	1	1	1	1	0,66	0,66



■ Arbre décisionnel

Les différentes étapes pour définir la franchissabilité d'un ouvrage par la marche pour les macro-crustacés (sous-groupes 5a et 5b) sont décrites ci-après.

1. Existence d'une voie de passage par marche

S'il existe une (ou plusieurs) voie(s) continue(s) à faible tirant d'eau (< 1 cm environ), alors effectuer un profil en long au niveau de chacune de ces voies de passage potentielles (ou uniquement de la voie potentielle qui paraît la plus favorable) et aller en 2.

Sinon, aller directement en 3.

S'il n'est pas possible d'identifier une voie de passage, il peut être intéressant d'apprécier la franchissabilité pour des conditions hydrologiques plus favorables pouvant se traduire par l'apparition d'une voie de marche. Suivant la note obtenue en poursuivant l'analyse (aller en 2), il sera alors possible d'apprécier l'utilité de revenir sur site à des débits différents.

2. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par les voies de marche

Au préalable, définir la classe de franchissabilité ICE à partir de la longueur totale cumulée et de la pente moyenne de la voie de passage, en utilisant les tableaux 30 et 31 page 154.

Puis, si la voie de marche a été décomposée en plusieurs parties, déterminer la classe de franchissabilité ICE de chaque partie en utilisant également les tableaux 30 et 31. Si une ou plusieurs parties présente(nt) une classe de franchissabilité plus faible que la classe obtenue lors de l'analyse globale de la voie, alors retenir la classe de la partie la plus déclassante.

S'il existe plusieurs voies de passage potentielles, faire le même exercice pour chaque voie et retenir, à l'échelle de l'ouvrage, la classe de franchissabilité ICE de la voie la moins déclassante.

Puis aller en 3.

3. Analyse de la franchissabilité de l'ouvrage par d'autres voies potentielles (en cas d'absence ou en complément de voie(s) de marche existante(s) à faible tirant d'eau)

Existe-t-il, par expertise, d'autres voies potentielles de passage dans des zones plus profondes ?

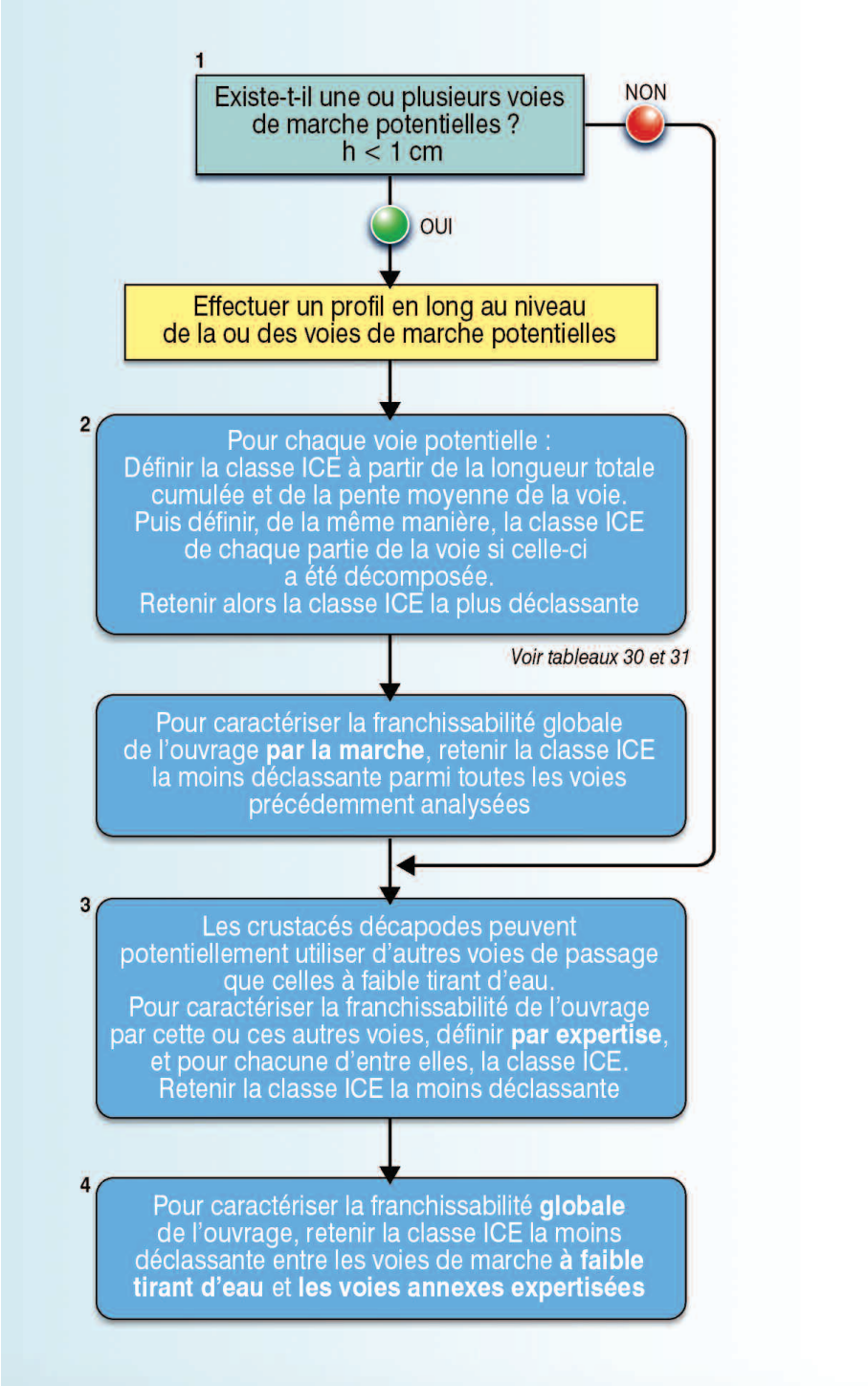
Si oui, définir par expertise la classe de franchissabilité éventuelle de ces autres voies et retenir celle de la voie la moins déclassante.

Aller en 4.

4. Détermination de la franchissabilité globale de l'ouvrage

Retenir à l'échelle de l'ouvrage la classe de franchissabilité ICE la moins déclassante entre celle obtenue pour le franchissement par la marche à faible tirant d'eau (à l'issue du point 2) et celle éventuellement obtenue par expertise d'autres voies de passage potentielles (à l'issue du point 3).

Figure 80



Arbre décisionnel permettant de définir les classes de franchissabilité ICE pour le franchissement par la marche chez les macro-crustacés.