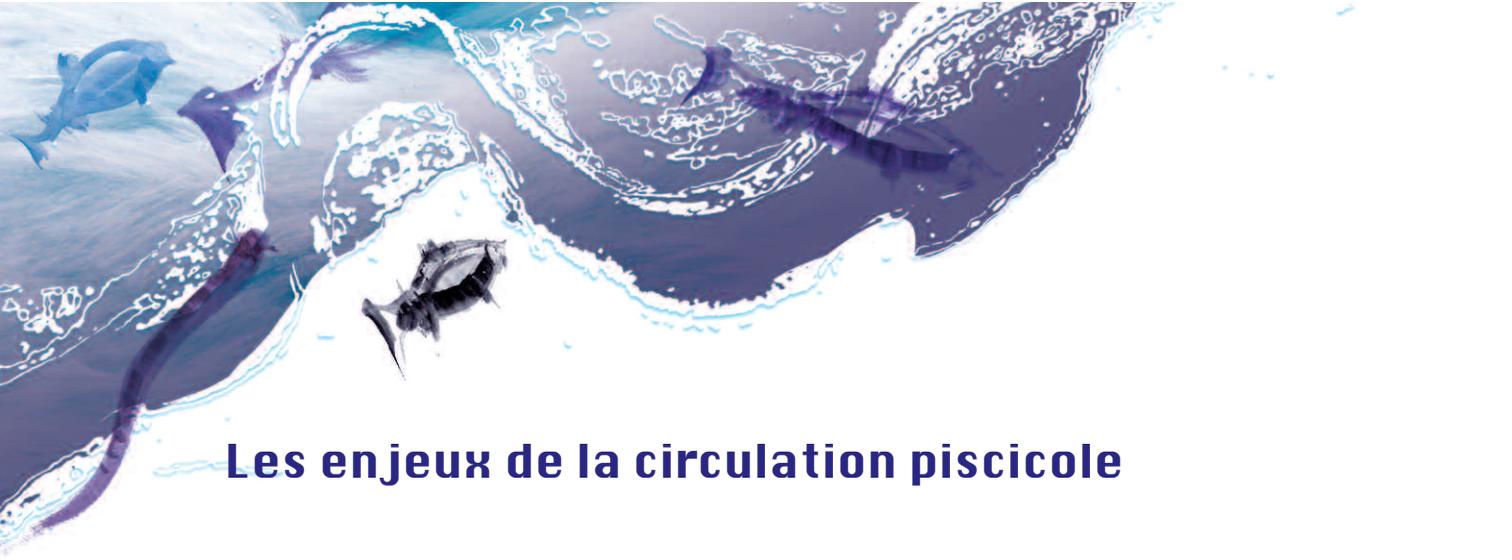


A

Continuité écologique & ichtyofaune

14 ■ Les enjeux de la circulation piscicole

33 ■ Les capacités de franchissement des poissons



Les enjeux de la circulation piscicole

Contexte biologique, mobilité et migration chez les poissons

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

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

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

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

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

■ Les grandes catégories de mouvements chez les poissons

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

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

Les mouvements de transports, dérive et dispersion

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

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

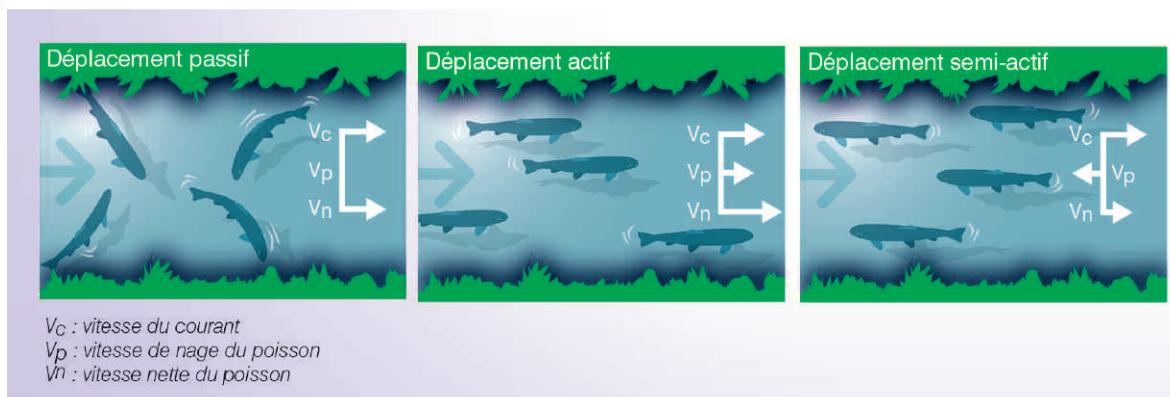
Chez les larves et les alevins, le phénomène de **dérive** est un phénomène naturel indispensable qui a une signification biologique plus fondamentale et qui est défini comme des mouvements passifs entre la zone de ponte et d'émergence et les premiers habitats de croissance. La dérive constitue une étape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

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

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

Figure

1



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

Les mouvements actifs

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

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

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

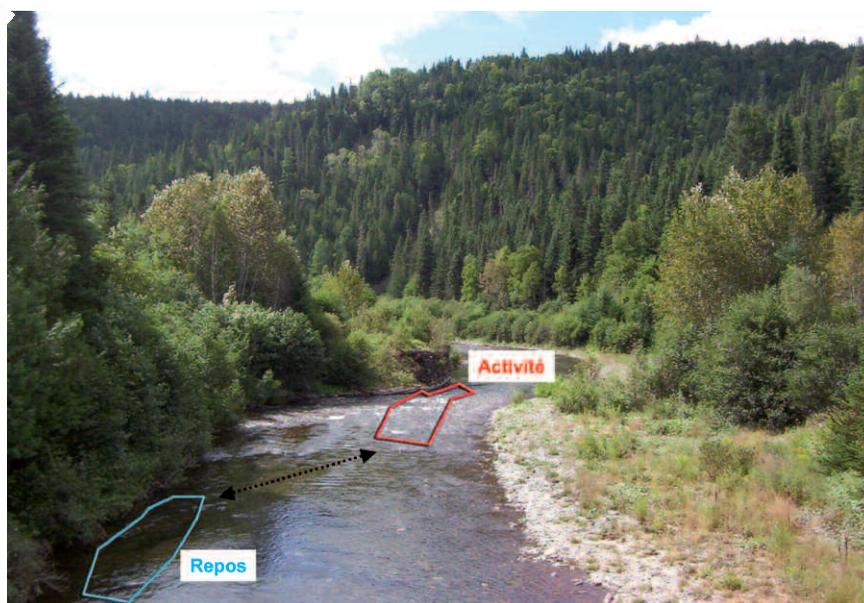
Ces déplacements modifient la structure des communautés et préfigurent la constitution de **nouvelles ichtyofaunes locales**. Ils doivent être pris en considération lorsqu'on étudie des rivières et des plans d'eau (réservoirs de barrages, centrale hydroélectrique, étang en évolution) susceptibles de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

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

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

Figure

2



© M. Ovidio - Université de Liège - LDPH

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Figure 3

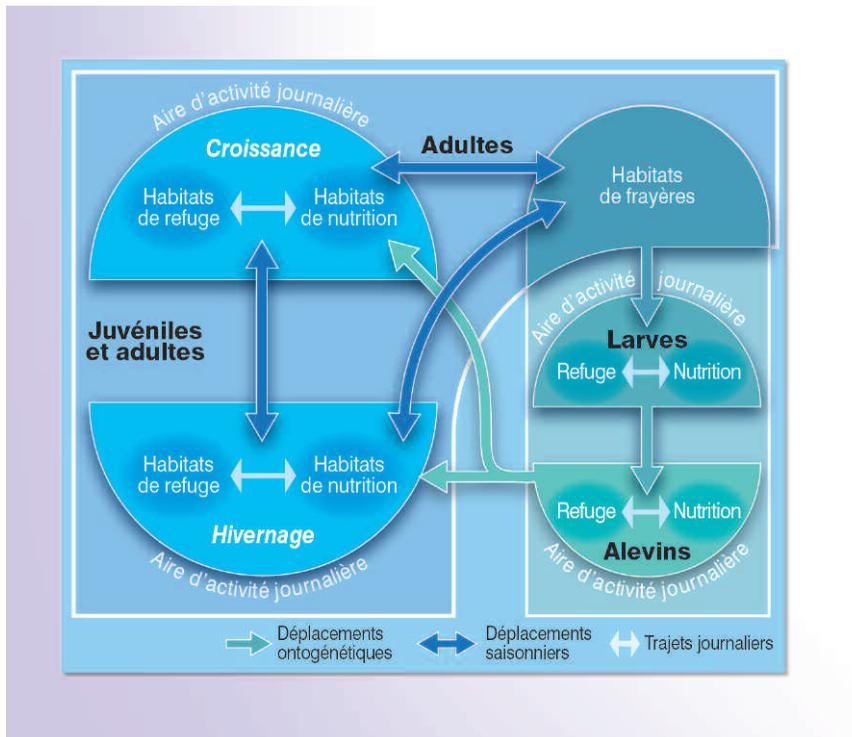


Schéma représentant une partie de la diversité des mouvements effectués par les poissons au cours de leur cycle biologique. Repris de Baras (1992).

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

■ Les différents types de migrateurs

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

Type 1 - Les migrateurs amphibiotiques anadromes

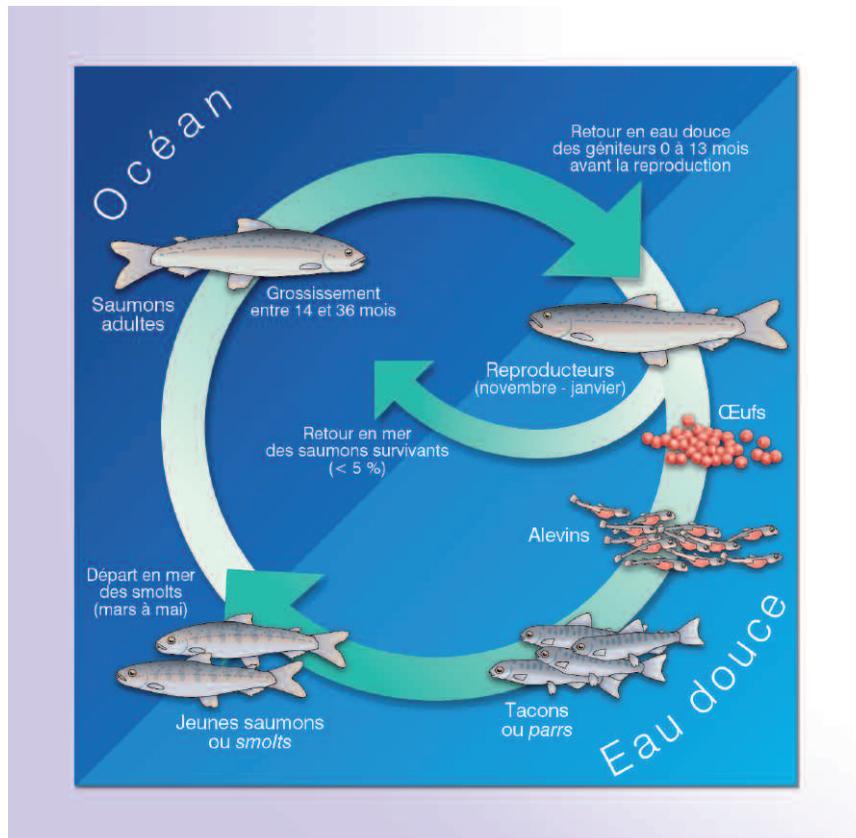
Les poissons migrateurs amphibiotiques anadromes sont dans l'obligation de se déplacer entre les eaux douces et la mer afin de réaliser complètement leur cycle biologique. Ils vivent en mer et viennent se reproduire en eau douce. La migration vers la mer concerne essentiellement les juvéniles et, dans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

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

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

Figure

4



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

Type 2 - Les migrateurs amphibiotiques catadromes

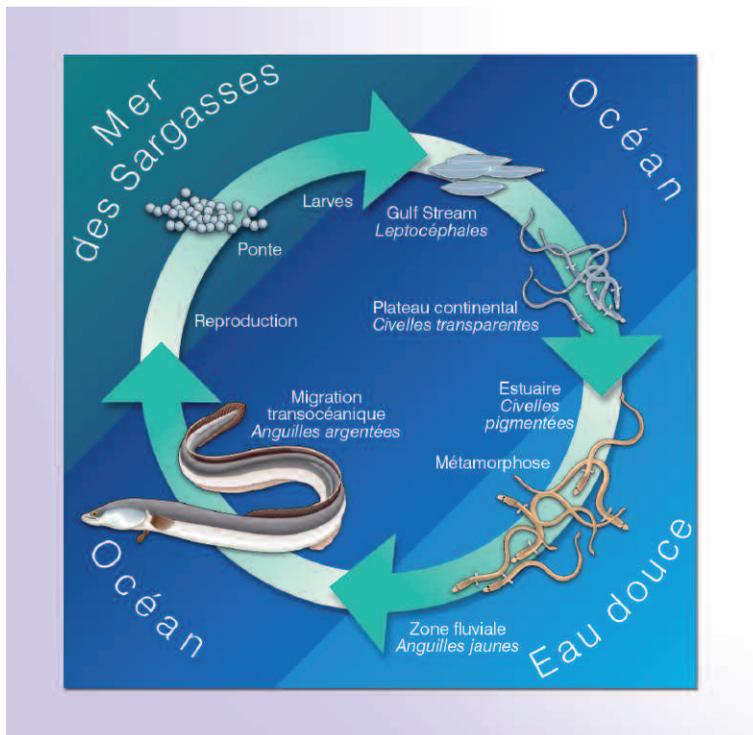
Les poissons migrateurs catadromes sont également des grands migrants, dans l'obligation de se déplacer entre l'eau douce et l'eau de mer pour réaliser leur cycle biologique, mais avec un cycle inversé par rapport aux migrateurs amphibiotiques anadromes. Ils remontent les fleuves au stade juvénile pour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

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

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

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

Figure 5



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

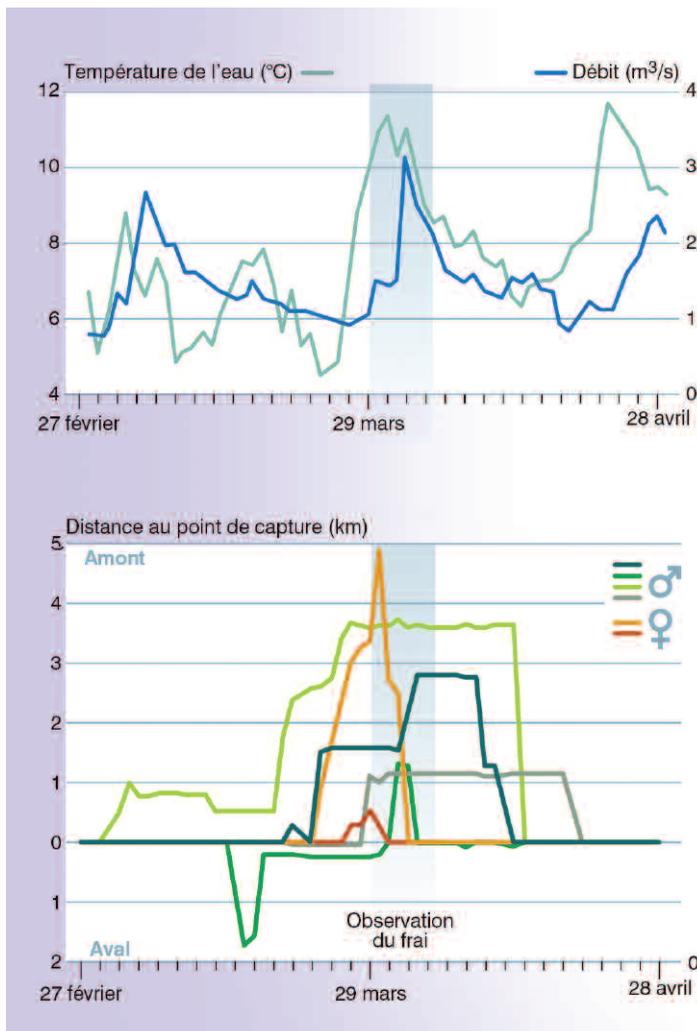
Type 4 - La plupart des autres espèces holobiotiques potamodromes

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

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

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

Figure 7



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

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

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

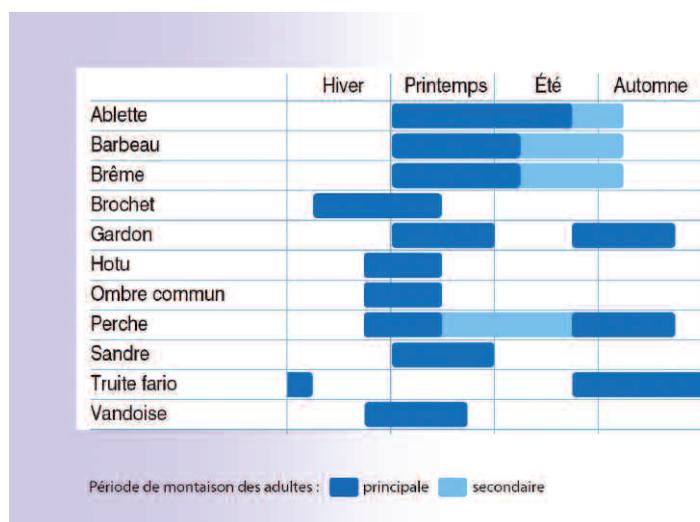
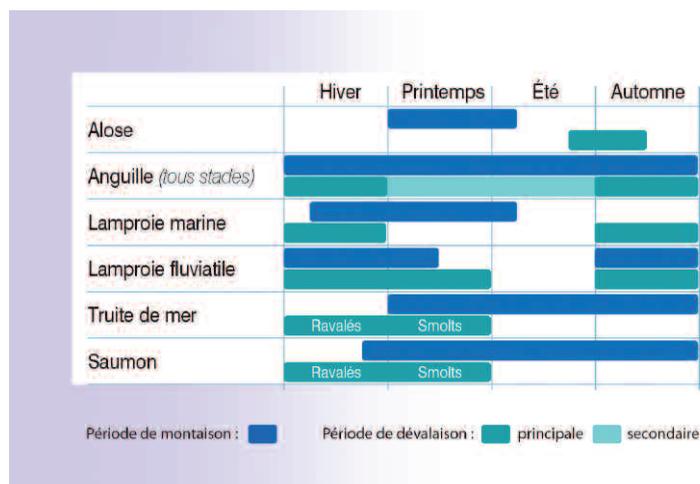
Il s'agit souvent de mouvements qui sont inscrits dans leur cycle biologique (refuge, activité, reproduction). Mais dans certains cas, il peut également s'agir d'**individus « explorateurs »** (infime partie de la population), qui développent des tactiques comportementales particulières, notamment adaptées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

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

■ Les principales périodes de migrations

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

Figure 8



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

Les différents types de barrières

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

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

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

Les obstacles peuvent créer des problèmes de franchissement :

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

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

■ Barrières impactant la montaison

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

Les seuils en rivière

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

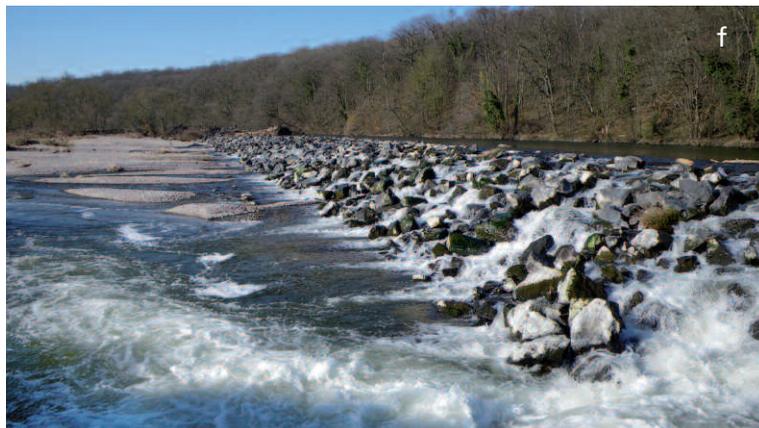
■ **soit des configurations mixtes comportant une succession de parties en pente et de parties plus ou moins verticales (redans...) (Figure 9bc).** Un redan (ou redent) est un décrochement dans le parement du seuil venant briser de façon très marquée la continuité du profil du seuil. La présence d'un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

Figure 9



a © Chanseau - Onema

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



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

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

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

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

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

Figure 10



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

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

Les barrages

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

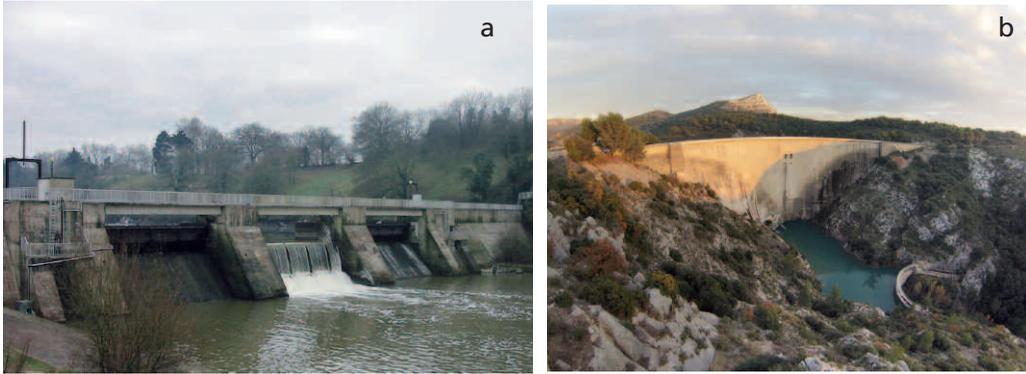
Suivant la topographie de la vallée et la nature du sol, les barrages ont été construits en béton, en terre, en enrochements ou partiellement avec chacun de ces matériaux.

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

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

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

Figure 11



a © Voegtlié - Ecogea
b © Baudoin - Onema

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

Les ouvrages routiers, autoroutiers et ferroviaires

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

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

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

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

Figure 12



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

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

■ Barrières impactant la dévalaison

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

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

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

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

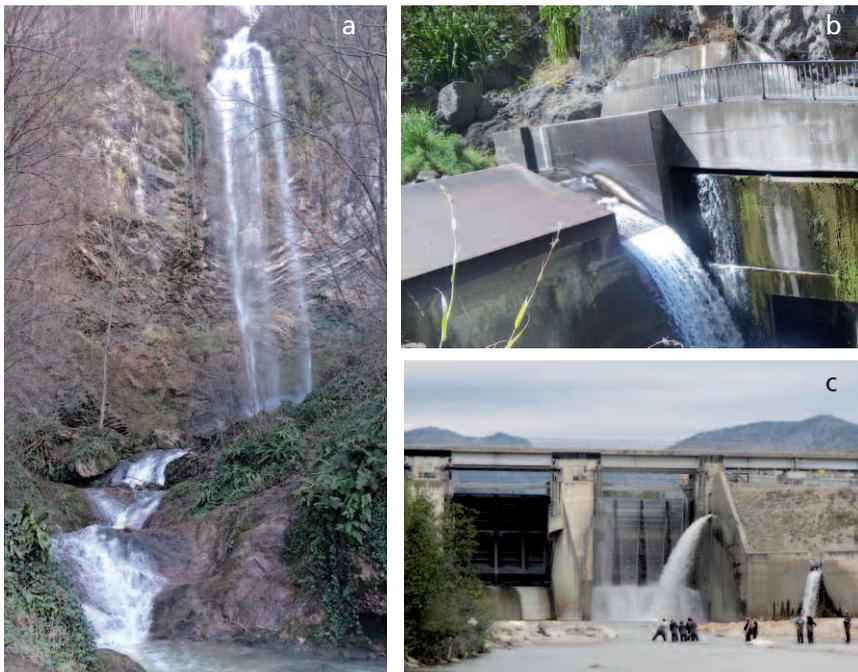
■ **soit en chute libre** : Les poissons se trouvent en situation de chute libre (en dehors de la lame d'eau), et atteignent à partir d'une certaine hauteur de chute, une vitesse limite fonction notamment de leurs tailles et de leurs morphologies. Des expérimentations ont montré clairement que des dommages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

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

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

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

Figure 13



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

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

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

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

Entraînement dans les prises d'eau

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

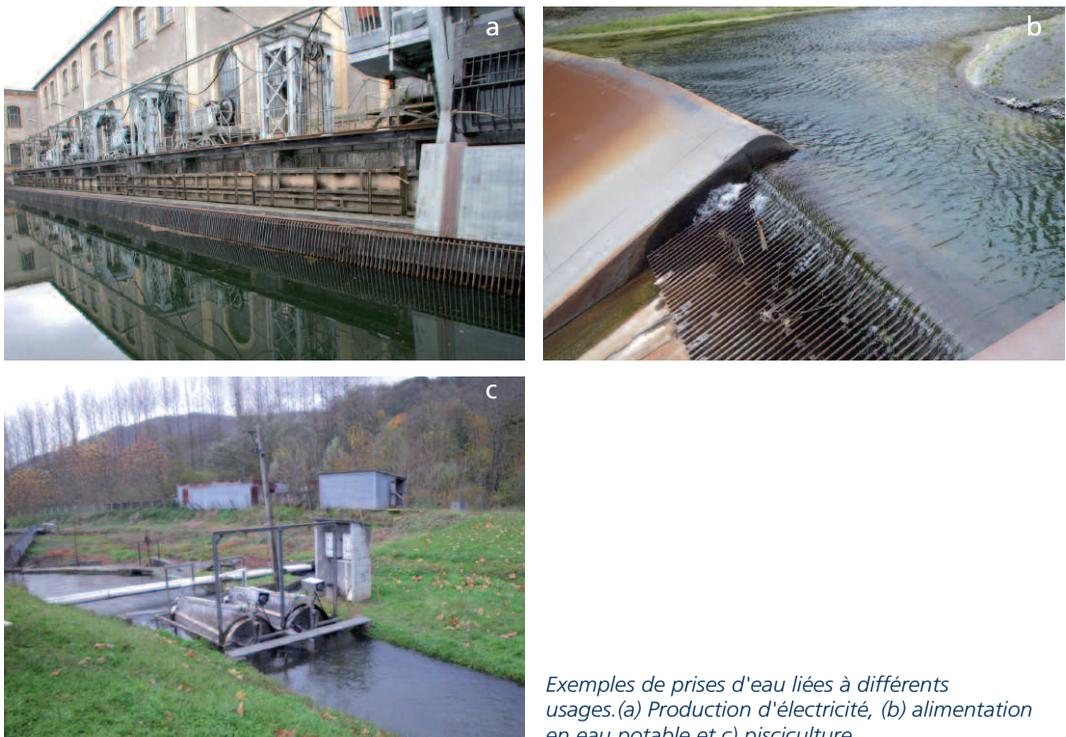
Les prises d'eau peuvent être liées à différents usages (Figures 14 abc) comme l'alimentation en eau potable, l'irrigation, le refroidissement de machines industrielles ou de générateurs nucléaires, la production piscicole (étang, pisciculture) ou la production d'électricité (centrale hydroélectrique).

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

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

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

Figure 14



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

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

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

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

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

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

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

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

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

■ Effets génétiques

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

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

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

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

■ Retards à la migration et mortalités par épuisement

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

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

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

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

■ Blessures et mortalités au niveau des ouvrages

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

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

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

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

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

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

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

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

■ Augmentation des risques de prédation et de maladies

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

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

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

Les capacités de franchissement des poissons

Les différents modes de franchissement

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

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

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

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

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

Figure 15



Exemples de modes de franchissement de poissons.

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

Les activités de nage

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

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

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

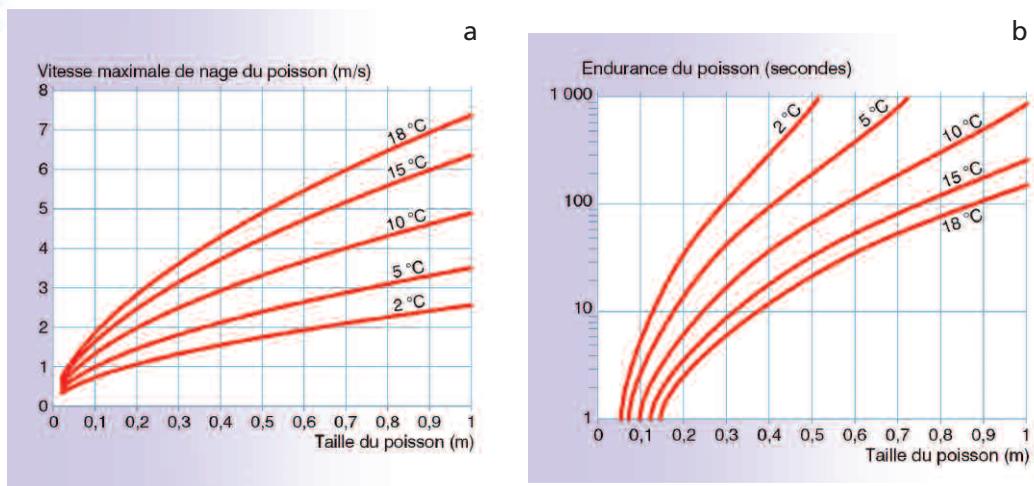
■ **l'activité de sprint ou de pointe**, résulte d'un effort intense et ne peut être maintenue qu'un temps très limité, de quelques secondes à quelques dizaines de secondes suivant l'espèce et la taille de l'individu.

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

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

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

Figure 16



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

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

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

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

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

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

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

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

Tableau

1

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

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

■ Tirant d'eau minimum

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

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

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

Figure 17

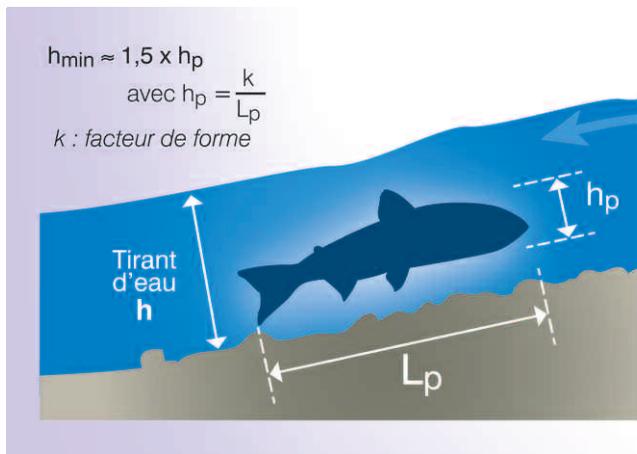


Schéma représentant le tirant d'eau considéré comme le minimum nécessaire pour qu'un poisson puisse nager convenablement.

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

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

Le franchissement par saut

■ Les capacités de saut

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

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

Figure 18



a © Borda - Onema
b © Burgun - Onema

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

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

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

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

où :

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

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

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

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

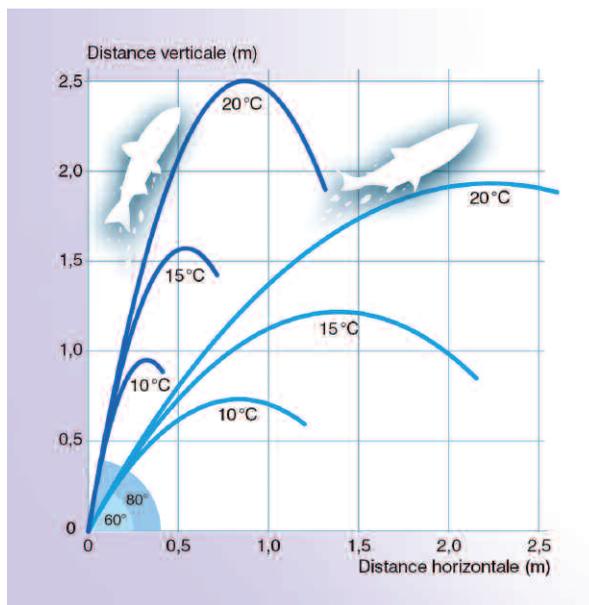
$$Y_{\max} = (U_{\max} \sin\beta)^2 / 2 g$$

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

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

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

Figure 19



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

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

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

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

Tableau 2

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

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

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

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

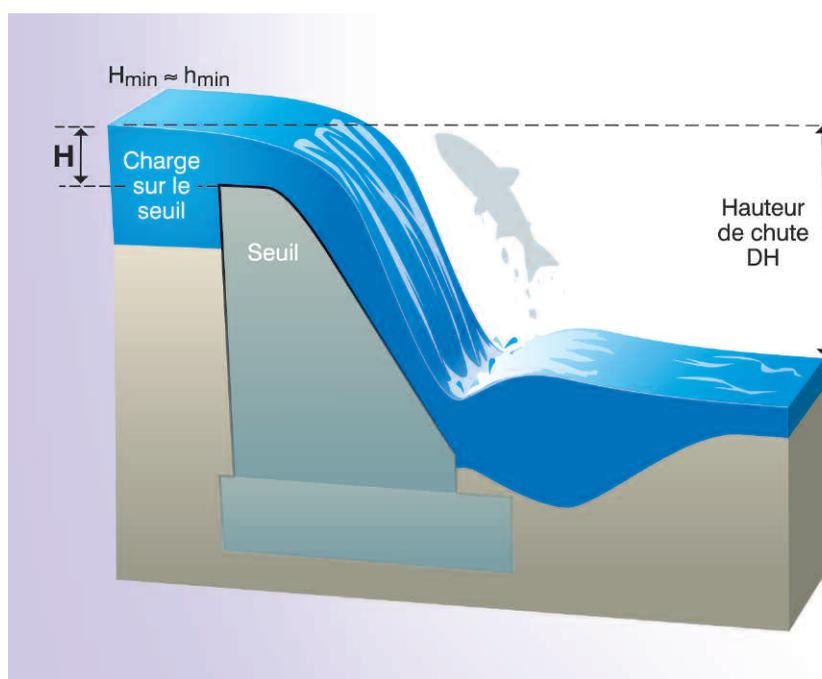
■ Charge minimale sur l'obstacle

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

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

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

Figure 20



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

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

Notions de fosse d'appel en aval de la chute

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

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

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

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

Figure 21



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

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

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

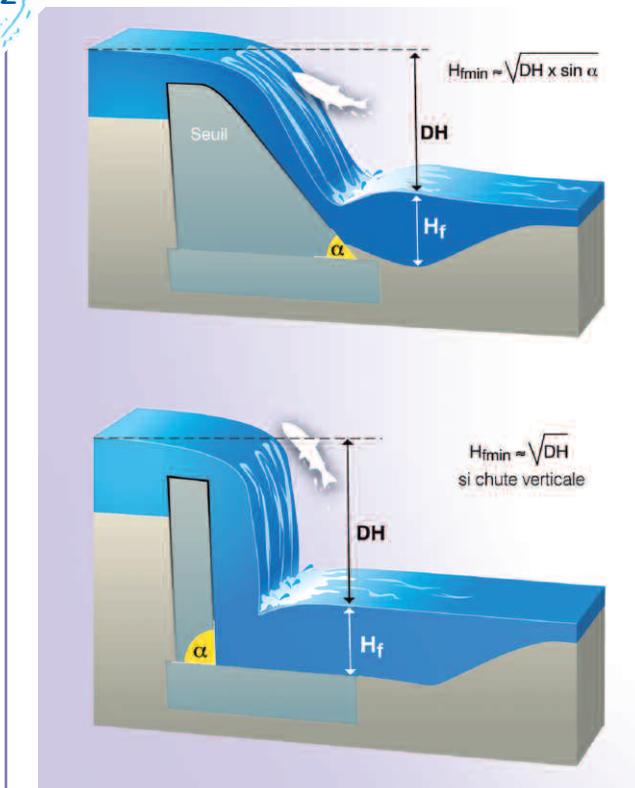
Dans la littérature, les critères donnés sur les profondeurs de fosses minimales sont très variables. Pour les auteurs prenant en compte la longueur du poisson, il est souvent mentionné une profondeur minimale de la fosse correspondant à 1 à 2 fois la longueur du poisson (Meixler et al. 2009). Ce critère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

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

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

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

Figure 22



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

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

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

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

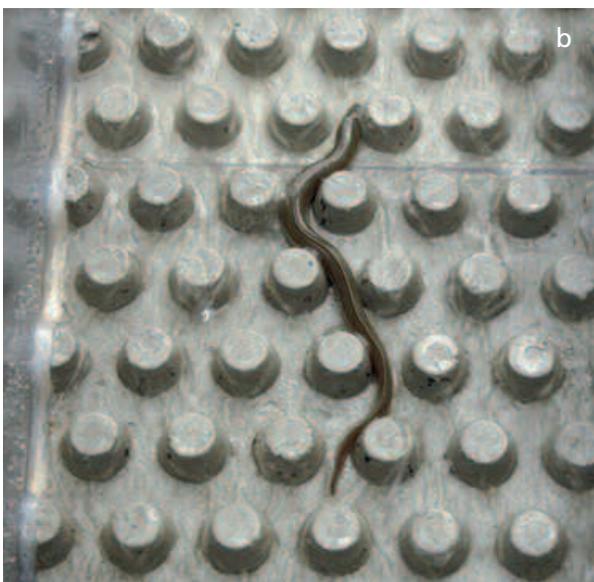
L'anguille, un cas particulier par ses capacités de reptation

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

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

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

Figure 23



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

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