

ACTUALISATION DES CONNAISSANCES SUR L'EFFICACITÉ ET LA CONCEPTION DES DISPOSITIFS DE MONTAISON POUR L'ALOSE

PROJET LIFE09 NAT/DE/000008

CONSERVATION AND
RESTORATION OF THE ALLIS SHAD
IN THE GIRONDE AND RHINE
WATERSHEDS

ACTION A1

2015



ACTUALISATION DES CONNAISSANCES SUR L'EFFICACITÉ ET LA CONCEPTION DES DISPOSITIFS DE MONTAISON POUR L'ALOSE

PROJET LIFE09 NAT/DE/000008

CONSERVATION AND RESTORATION OF THE ALLIS
SHAD IN THE GIRONDE AND RHINE WATERSHEDS
ACTION A1

Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

Projet WSP n° : 141-22223-00
Date : 2015



—
WSP France S.A.S.

3, rue des Charrons - Espace Hadrien
31700 Blagnac – France

Tél : +33 5 31 22 44 38
www.wspgroup.com



PRÉPARÉ PAR

François Groux, ingénieur
WSP

Jean Therrien, biologiste
WSP

Matthieu Chanseau, docteur en biologie
ONEMA

Dominique Courret, ingénieur
Pôle Ecohydraulique ONEMA - IMFT

Stephane Tétard, ingénieur - chercheur
EDF

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier plusieurs personnes dont l'aide a été déterminante dans la réalisation de ce document. D'abord, A. Haro et S. Amaral qui nous ont accompagnés sur plusieurs sites et fournis de nombreux documents. Ensuite, C. Freese et D. Pugh pour les informations fournies pendant et après les visites. Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont eu l'amabilité de nous recevoir ou de nous accompagner lors des visites : R. Bleistine, S. Gottardy, J. Griffin, K. Long, J. Lucas, M. Martinek, S. Medford, C. Mooney, R. Moyer, R. Murray, J. Ragonese, C. Simmons, J. Tryninewski, R. Wagner et M. Walsh. Nous remercions aussi ceux qui nous ont fournis des documents, des contacts et de l'information : C. Caudill, J. Caumartin, D. Dixon et T. Castro-Santos. Enfin, nos remerciements vont à François Travade et Michel Larinier qui nous ont offert leur aide et toute leur expertise au cours de ce projet.

L'original du document technologique que nous vous transmettons a été authentifié et sera conservé par WSP pour une période minimale de dix ans. Puisque le fichier transmis n'est plus sous le contrôle de WSP et que son intégrité n'est pas assurée, aucune garantie n'est donnée sur les modifications ultérieures qui peuvent y être apportées.

ÉQUIPE DE RÉALISATION

ONEMA

Responsable de projet	Jean-Michel Cardon
Experts du groupe de travail	Matthieu Chanseau Dominique Courret, Pôle Ecohydraulique - IMFT

EDF

Expert du groupe de travail	Stéphane Tétard, EDF
-----------------------------	----------------------

WSP

Responsable de projet	Cécile Llovel
Équipe de projet	François Groux Jean Therrien Claudine Breton
Avec la contribution volontaire de	Michel Larinier François Travade
Édition	Nancy Paquet
Traduction	Joanie Mailloux Johanne Fortier Sara-Anne Bilodeau

Référence à citer :

GROUX F., THERRIEN J., CHANSEAU M., COURRET D., TÉTARD S. 2015. *Actualisation des connaissances sur l'efficacité et la conception des dispositifs de montaison pour l'alose - Projet LIFE09 NAT/DE/000008 - Conservation and restoration of the Allis shad in the Gironde and Rhine watersheds – Action A1*. Rapport de WSP à l'ONEMA. 85 p.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	STATUT DE L'ALOSE (<i>ALOSA ALOSA</i>) EN EUROPE.....	1
1.2	L'ALOSE AMÉRICAINNE (<i>ALOSA SAPIDISSIMA</i>), UNE ESPÈCE PROCHE DE L'ALOSE EUROPÉENNE	2
1.3	CADRE ET OBJECTIFS	3
2	FACTEURS BIOLOGIQUES ET COMPORTEMENT MIGRATOIRE DE L'ALOSE.....	5
2.1	CAPACITÉ DE NAGE	5
2.2	COMPORTEMENT MIGRATOIRE.....	5
3	BILANS DES CONNAISSANCES SUR LES PASSAGES D'ALLOSES DANS LES DISPOSITIFS DE MONTAISON.....	9
3.1	EFFECTIFS CONTRÔLÉS ET TENDANCES	12
3.2	PÉRIODES, DÉBITS ET TEMPÉRATURES	17
4	BILAN DES CONNAISSANCES SUR L'EFFICACITÉ DES DISPOSITIFS.....	23
4.1	NOTIONS D'EFFICACITÉ D'UN DISPOSITIF.....	23
4.2	TECHNIQUES DE SUIVI.....	23
4.3	EFFICACITÉ DES DISPOSITIFS.....	30
4.3.1	COTE EST DES ÉTATS-UNIS	30
4.3.2	CÔTE OUEST DES ÉTATS-UNIS – RIVIÈRE COLUMBIA	33
4.3.3	FRANCE – RIVIÈRES GARONNE ET DORDOGNE	33
4.4	PRINCIPALES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES PAR LES ALOSES.....	34
4.4.1	TROUVER LES ENTRÉES ET PÉNÉTRER À L'INTÉRIEUR DES DISPOSITIFS.....	34
4.4.1.1	NOMBRE DE VOIES DE PASSAGE INSUFFISANT.....	35
4.4.1.2	DES ENTRÉES MAL POSITIONNÉES ET PEU ATTRACTIVES	37
4.4.2	PROGRESSER À L'INTÉRIEUR DES DISPOSITIFS.....	42
4.4.2.1	DIFFICULTÉS SUR LES PARTIES AVAL DES DISPOSITIFS.....	43

4.4.2.2	DIFFICULTÉS LIÉES AUX CONDITIONS HYDRAULIQUES INTERNES DANS LES PASSES.....	43
4.4.2.3	DIFFICULTÉS À NÉGOCIER LES VIRAGES.....	45
4.4.2.4	DIFFICULTÉS POUR ENTRER ET STATIONNER DANS LES SYSTÈMES DE PIÉGEAGE DES ASCENSEURS	45
4.5	CONCLUSION.....	46
5	RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION DES DISPOSITIFS.....	49
5.1	HYDROLOGIE ET GAMME DE FONCTIONNALITÉ DES DISPOSITIFS	49
5.2	NOMBRE DE DISPOSITIF AU NIVEAU D'UN AMÉNAGEMENT COURT-CIRCUITANT UN TRONÇON DE COURS D'EAU	49
5.3	NOMBRE ET POSITION DES ENTRÉES À L'ÉCHELLE DE L'OBSTACLE....	50
5.4	DÉBIT D'ALIMENTATION DES DISPOSITIFS	52
5.5	INJECTION DES DÉBITS D'ATTRAIT	54
5.6	CONDITIONS HYDRAULIQUES ET DIMENSIONS DES ENTRÉES	55
5.7	CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES DISPOSITIFS DE FRANCHISSEMENT ADAPTÉS À L'ALOSE.....	56
5.7.1	PASSES À BASSINS	57
5.7.2	PRÉ-BARRAGES	60
5.7.3	PASSES « NATURELLES » OU EN ENROCHEMENTS	60
5.7.4	ASCENSEURS	68
5.7.5	ÉCLUSES DE NAVIGATION.....	72
5.7.6	CHOIX DU TYPE DE DISPOSITIF.....	74
6	CONCLUSIONS.....	75
7	BIBLIOGRAPHIE.....	79

TABLEAUX

TABLEAU 1-1	PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES BIOLOGIQUES DE L'ALOSE EUROPÉENNE (<i>ALOSA ALOSA</i>) ET DE L'ALOSE AMÉRICAINE (<i>ALOSA SAPIDISSIMA</i>) D'APRÈS BAGLINIÈRE ET ELIE (2000) ; MACKENZIE ET AL. (1985), LIMBURG ET AL. (2003), ET GREENE K.E. (2009).....	2
TABLEAU 3-1	PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES OBSTACLES ET DE LEUR(S) DISPOSITIF(S) DE FRANCHISSEMENT AU NIVEAU DESQUELS DES PASSAGES D'ALLOSES SONT COMPTABILISÉS SUR LA CÔTE EST DES E.U.....	10
TABLEAU 3-2	CARACTÉRISTIQUES DES OBSTACLES ET DE LEUR(S) DISPOSITIF(S) DE FRANCHISSEMENT AU NIVEAU DESQUELS DES PASSAGES D'ALLOSES SONT COMPTABILISÉS EN EUROPE.	11
TABLEAU 3-3	RYTHMES DE MIGRATION DES ALOSES AU NIVEAU DES PREMIERS OUVRAGES AVAL DE HOLYOKE (CONNECTICUT), LAWRENCE (MERRIMACK) ET CONOWINGO (SUSQUEHANNA)...	18
TABLEAU 3-4	RYTHMES DE MIGRATION DES ALOSES AU NIVEAU DES PRINCIPALES STATIONS DE CONTRÔLE EN FRANCE.	18
TABLEAU 4-1	TAUX DE TRANSFERT DES ALOSES ENTRE LES DIFFÉRENTS OUVRAGES DES RIVIÈRES SUSQUEHANNA, MERRIMACK ET CONNECTICUT, CÔTE EST DES E.U.	24
TABLEAU 4-2	TAUX DE TRANSFERT DES ALOSES ENTRE LES OUVRAGES DE THE DALLES, JOHN DAY ET MC NARY SUR LA RIVIÈRE COLUMBIA, CÔTE OUEST DES E.U.	25
TABLEAU 4-3	TAUX DE TRANSFERT DES ALOSES ENTRE LES DIFFÉRENTS OUVRAGES DE LA RIVIÈRE DORDOGNE, FRANCE.....	25
TABLEAU 4-4	SYNTHÈSE DES DIFFÉRENTES ÉTUDES MENÉES À L'AIDE DE LA TECHNIQUE DE RADIODÉLÉMETRIE AFIN DE DÉTERMINER LE COMPORTEMENT DES ALOSES ET LES IMPACTS DES OUVRAGES.....	27
TABLEAU 4-5	SYNTHÈSE DES DIFFÉRENTES ÉTUDES MENÉES À L'AIDE DE LA TECHNIQUE RFID AFIN DE DÉTERMINER LE COMPORTEMENT DES ALOSES AU NIVEAU DES DISPOSITIFS DE FRANCHISSEMENT.....	29

FIGURES

FIGURE 2-1	EXEMPLE DE DÉPLACEMENT PRÉFÉRENTIEL DES ALOSES LE LONG DES RIVES ET INFLUENCE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES DANS LE CANAL DE FUITE, CENTRALE DE LOWELL, RIVIÈRE MERRIMACK, USA. (ALDEN, 2011).....	7
FIGURE 3-1	ÉVOLUTION DES PASSAGES D'ALLOSES AU NIVEAU DES OUVRAGES DE HOLYOKE, TURNERS FALLS (GATE HOUSE) ET VERNON SUR LA RIVIÈRE CONNECTICUT DE 1955 À 2015.....	14
FIGURE 3-2	ÉVOLUTION DES PASSAGES D'ALLOSES AU NIVEAU DES OUVRAGES DE LAWRENCE ET LOWELL SUR LA RIVIÈRE MERRIMACK DE 1983 À 2015.....	14
FIGURE 3-3	ÉVOLUTION DES PASSAGES D'ALLOSES AU NIVEAU DES OUVRAGES DE CONOWINGO, HOLTWOOD, SAFE HARBOR SUR LA RIVIÈRE SUSQUEHANNA DE 1991 À 2015.	15
FIGURE 3-4	ÉVOLUTION DES PASSAGES D'ALLOSES AU NIVEAU DES OUVRAGES DE BONNEVILLE (KM 235), THE DALLES (KM 308), JOHN DAY (KM 347) ET MCNARY (KM 470) SUR LA RIVIÈRE COLUMBIA DE 1938 À 2015 (NB : DES PASSAGES CONSÉQUENTS, NON CONNUS, ONT LIEU PAR L'ÉCLUSE DE NAVIGATION DE BONNEVILLE).....	15
FIGURE 3-5	ÉVOLUTION DES PASSAGES D'ALLOSES DANS LE BASSIN GARONNE-DORDOGNE ENTRE 1989 ET 2015.	16
FIGURE 3-6	ÉVOLUTION DES PASSAGES D'ALLOSES DANS LE BASSIN DE LA LOIRE ENTRE 1998 ET 2015.	16
FIGURE 3-7	ÉVOLUTION DES PASSAGES D'ALLOSES EN BRETAGNE ET NORMANDIE ENTRE 1994 ET 2015.	17
FIGURE 3-8	RYTHMES DE MIGRATION DES ALOSES AU NIVEAU DE L'OUVRAGE DE BONNEVILLE SUR LA RIVIÈRE COLUMBIA DE 2006 À 2015 (SOURCE : HTTP://WWW.CBR.WASHINGTON.EDU/DART/).....	19
FIGURE 3-9	RYTHMES DE MIGRATION AU NIVEAU DE L'OUVRAGE DE DESCARTES SUR LA CREUSE (FRANCE) DE 2007 À 2014 (BACH ET AL., 2015).....	20
FIGURE 3-10	RYTHMES DE MIGRATION AU NIVEAU DE L'OUVRAGE DE CHÂTELLERAULT SUR LA VIENNE (FRANCE) DE 2004 À 2014 (BACH ET AL., 2015).....	20
FIGURE 3-11	RYTHMES DE MIGRATION AU NIVEAU DE L'OUVRAGE D'ARZAL SUR LA VILAINE (FRANCE) DE 1996 À 2014 (BRIAND ET AL., 2015).....	21
FIGURE 4-1	TAUX DE TRANSFERT ENTRE LES OUVRAGES DE CONOWINGO ET HOLTWOOD ET HOLTWOOD ET SAFE HARBOR SUR LA RIVIÈRE SUSQUEHANNA EN FONCTION DES DÉBITS MOYENS EN MAI.	32

FIGURE 4-2	TAUX DE TRANSFERT ENTRE LES OUVRAGES DE JOHN DAY ET MC NARY SUR LA RIVIÈRE COLUMBIA EN FONCTION DES DÉBITS MOYENS EN JUIN SUR LA PÉRIODE 1968 – 2003.	33
FIGURE 4-3	PLAN SOMMAIRE DES DEUX ENTRÉES DE L'ASCENSEUR DE CONOWINGO SUR LA RIVIÈRE SUSQUEHANNA (NORMANDEAU ET GOMEZ AND SULLIVAN, 2012).	38
FIGURE 4-4	INFLUENCE DU FONCTIONNEMENT DES GROUPES SUR LES CONDITIONS HYDRAULIQUES À L'AVANT DE LA CENTRALE DE CONOWINGO SUR LA RIVIÈRE SUSQUEHANNA A) TURBINES FRANCIS EN MARCHÉ ET ALIMENTATION DE L'ENTRÉE A B) JET EN SORTIE DE L'ENTRÉE A C) TURBINES KAPLAN EN MARCHÉ ET ALIMENTATION DE L'ENTRÉE C D) CONDITIONS HYDRAULIQUES AU NIVEAU DE LA SORTIE DES TURBINES KAPLAN.	39
FIGURE 4-5	SUIVI DU DÉPLACEMENT DES ALOSES PAR TÉLÉMÉTRIE EN AVANT DE L'OUVRAGE GATE HOUSE (SITE DE TURNERS FALLS, RIVIÈRE CONNECTICUT) ET POSITION DES ENTRÉES DE LA PASSE (CASTRO-SANTOS ET AL., 2014).	40
FIGURE 5-1	A ET B) VUES SCHÉMATIQUES DE PASSES À BASSINS À ÉCHANCRURE LATÉRALE ALTERNÉE ET À FENTE VERTICALE (BAUDOIN, ET AL., 2014). C) PASSE À ÉCHANCRURE LATÉRALE AU SEUIL DE MONTANS – SAINT SAUVEUR SUR LE TARN. D) PASSE À DOUBLE FENTES VERTICALES D'AUGREILH SUR L'ADOUR. E) PASSE À SIMPLE FENTE VERTICALE AU SEUIL DE LA CAVALETADE SUR LA GARONNE. F) VIRAGE AU NIVEAU DE LA PASSE À FENTE VERTICALE DE L'USINE DE MASSEYS SUR LE GAVE D'OLORON.	59
FIGURE 5-2	ILLUSTRATIONS DES RAMPES EN ENROCHEMENTS JOINTIFS. A) ÉTUDE SUR MODÈLE RÉDUIT (EXTRAITE DE LARINIER ET AL. 2006) B) RAMPES FORMANT DES PRÉ-BARRAGES AU NIVEAU DU SEUIL DE SAINT-LAURENT. C) SEUIL FRANCHISSABLE PAR CONCEPTION DE L'ESCAR SUR LE GAVE DE PAU E) RAMPE AU NIVEAU DU SEUIL DE TOULOUZETTE SUR L'ADOUR.	61
FIGURE 5-3	ILLUSTRATIONS DES RAMPES À MACRORUGOSITÉS RÉGULIÈREMENT RÉPARTIES. A) COUPE LONGITUDINALE SCHÉMATIQUE (BAUDOIN, ET AL., 2014). B ET C) DÉTAILS DES ÉCOULEMENTS ET D'UNE RUGOSITÉ DE FOND. D) RAMPE DE BOURG-CHARENTE SUR LA CHARENTE (HORS D'EAU). E) RAMPE DE MALHAUTE SUR L'ORB. F) RAMPE DE GOUEX-VILLAR SUR LA VIENNE.	64
FIGURE 5-4	ILLUSTRATIONS DES RAMPES À MACRORUGOSITÉS EN RANGÉES PÉRIODIQUES. A) REPRÉSENTATIONS SCHÉMATIQUES (BAUDOIN ET AL., 2014). B) RIVIÈRE DE CONTOURNEMENT AVEC RANGÉES PÉRIODIQUES À AVOLSHEIM SUR LA BRUCHE. C) PASSE DE LA BESSETTE SUR LA DIÈGE.	66

FIGURE 5-5	ILLUSTRATIONS DES RIVIÈRES DE CONTOURNEMENT À FAIBLE PENTE. A) RIVIÈRE DE BIRON SUR LE GAVE DE PAU ; B) RIVIÈRE DE LIVRON SUR LA DROME	68
FIGURE 5-6	ILLUSTRATIONS DES ASCENSEURS. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE (EXTRAIT DE TRAVADE ET LARINIER, 2002).	70
FIGURE 5-7	ILLUSTRATIONS DES ASCENSEURS (ZONE DE PASSAGE, ANTI-RETOUR, BASSIN DE STABULATION ET CUVE DE RELEVAGE) A) GOLFECH SUR LA GARONNE B) TUILIÈRES SUR LA DORDOGNE C) CONOWINGO SUR LA SUSQUEHANNA D) HOLYOKE (USINE) SUR LA CONNECTICUT E) LOWELL SUR LA MERRIMACK F) CUVE DE CONOWINGO G) CUVE DE HOLTWOOD SUR LA SUSQUEHANNA.....	71
FIGURE 5-8	ILLUSTRATIONS DES ÉCLUSES DE NAVIGATION. A) ÉCLUSE DE PINOPOLIS SUR LA RIVIÈRE COOPER (US) B) LOCK AND DAM 1 SUR LA RIVIÈRE CAPE FEAR (US) C) ÉCLUSE DE BEAUCAIRE SUR LE RHÔNE (FRANCE).....	73
FIGURE 5-9	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES ÉCLUSES DE NAVIGATION POUR LE FRANCHISSEMENT DES POISSONS. EXEMPLE DES ÉCLUSES DU RHÔNE (ZYLBERBLAT ET AL., 2011). A) ATTRAIT DES POISSONS ; B) FERMETURE DES PORTES ; C) SORTIE DES POISSONS.....	73

PLANCHES PHOTOS

FRANCE :

- 1 : GARONNE – GOLFECH
- 2 : DORDOGNE – TUILIÈRES
- 3 : ALLIER – VICHY
- 4 : VILAINE – ARZAL
- 5 : VIENNE – CHÂTELLERAULT
- 6 : AULNE – CHATEAULIN
- 7 : CREUSE - DESCARTES
- 8 : VIRE – CLAIE-DE-VIRE
- 9 : ORNE – MAY SUR ORNE

ÉTATS-UNIS :

- 1 : SUSQUEHANNA – CONOWINGO

- 2 : SUSQUEHANNA – HOLTWOOD
- 3 : SUSQUEHANNA – SAFE-HARBOR
- 4 : SUSQUEHANNA – YORK-HAVEN
- 5 : MERRIMACK – LAWRENCE
- 6 : MERRIMACK – LOWELL
- 7 : MERRIMACK – AMOSKEAG
- 8 : CONNECTICUT – HOLYOKE
- 9 : CONNECTICUT – TURNERS-FALLS
- 10 : CONNECTICUT – VERNON

1 INTRODUCTION

1.1 STATUT DE L'ALOSE (*ALOSA ALOSA*) EN EUROPE

On trouve actuellement des aloses sur les côtes du sud de l'Europe au sud de l'Islande et à la Norvège (Maitland et *al.*, 2003).

Les cours d'eau historiquement colonisés par l'alose vraie *Alosa alosa* s'étendaient du Maroc à l'Allemagne et aux îles britanniques, mais l'espèce semble se concentrer maintenant sur la partie centrale de son aire de répartition, entre la France et le Portugal (Maitland et *al.*, 2003).

Les populations d'alose ont régressé sur la grande majorité des cours d'eau européens dès la fin du XIX^e siècle et ils ont même disparu sur de nombreuses rivières (Elbe, Rhin, Meuse, Tamise, Seine, Sébou, etc.) en lien avec la construction de barrages, la dégradation de la qualité des milieux et la surpêche (Baglinière et Elie, 2000). Le réchauffement climatique pourrait faire peser des menaces supplémentaires sur l'espèce en lien notamment avec la diminution des débits des cours d'eau, l'augmentation de la température de l'eau, la modification des conditions de vie estuarienne et océanique, etc.

La France abrite encore de nombreuses populations d'aloses réparties sur les principaux fleuves de la façade atlantique et de la mer du Nord. La population du bassin Gironde-Garonne-Dordogne, considérée pendant longtemps comme la plus importante d'Europe avec des remontées pouvant dépasser 700 000 individus par an (Chanseau et *al.*, 2005), a toutefois fortement régressé depuis le début des années 2000 (Rougier et *al.*, 2012). Elle est actuellement grandement menacée.

Sur le bassin rhénan, l'espèce, autrefois abondante, a été très affectée par les activités anthropiques (grands travaux de rectification de Tulla au XIX^e siècle, construction de barrages pour la production d'hydroélectricité, qualité du milieu). Un projet de réintroduction a été lancé en 2007, dans le cadre d'un programme européen Life (Scharbert et *al.*, 2011). Après une phase de vérification de l'existence d'habitats favorables, il consiste pour l'essentiel à procéder à des opérations de repeuplement, à suivre le retour quelques années après des poissons issus de ces opérations et à vérifier l'existence d'une reproduction naturelle. Les premiers résultats paraissent encourageants.

En Grande Bretagne et en Irlande, l'espèce est présente dans les eaux côtières, mais il existe a priori très peu de cours d'eau sur lesquels la reproduction est avérée (Aprahamian et *al.*, 1998 ; Henderson, 2003 ; Doherty et *al.*, 2004). La Tamar semble être la seule rivière à accueillir actuellement une population d'alose européenne (Gratton et *al.*, 2015).

Dans la péninsule ibérique, au Portugal et en Espagne, tous les principaux cours d'eau étaient historiquement colonisés par l'espèce. La construction de barrages a impacté fortement les populations (Costa et *al.*, 2001) et aujourd'hui, seules quelques rivières sont encore fréquentées comme le Minho ou le Mondego (Mota, 2014).

Au final, l'alose européenne *Alosa alosa* se trouve globalement dans une situation difficile sur toute son aire de répartition. Elle est identifiée dans la liste rouge de l'UICN et fait partie des espèces listées dans l'annexe III de la Convention de Berne et dans la Directive Habitats. La présence de barrages sur les cours d'eau, qui empêchent tout ou partie des populations de rejoindre les habitats les plus fonctionnels pour la reproduction des adultes et la croissance des juvéniles, explique en partie, avec la dégradation des milieux et la surpêche, la situation actuelle de l'espèce.

1.2 L'ALOSE AMÉRICAINNE (*ALOSA SAPIDISSIMA*), UNE ESPÈCE PROCHE DE L'ALOSE EUROPÉENNE

Il est généralement admis que l'alose américaine *Alosa sapidissima*, ou alose savoureuse, est une proche cousine de l'alose européenne. Leurs caractéristiques biologiques et leur comportement sont proches (Tableau 1-1). La principale différence concerne l'itéroparité : la proportion d'alose américaine survivant à la reproduction et pouvant se reproduire plusieurs fois peut être très importante selon les cours d'eau alors que la très grande majorité des géniteurs d'alose européenne meurt après la reproduction.

L'alose américaine est une espèce anadrome dont l'aire de répartition s'étend de l'est du Canada et de la Nouvelle-Angleterre à la Floride aux États-Unis. Les populations les plus importantes sur la côte américaine sont situées de la baie de Chesapeake (Virginie et Maryland) jusqu'au Massachusetts (ASMFC, 2007).

Les populations sont globalement dans une situation peu satisfaisante en raison de la construction de barrages, de la dégradation de la qualité des milieux et de la surpêche (Limburg et al., 2009). Alors qu'à l'origine, plus de 130 cours d'eau étaient colonisés par l'espèce sur la côte atlantique, moins de 70 systèmes accueillent encore aujourd'hui une population (Limburg et al., 2003).

D'importants efforts ont été réalisés afin de restaurer les populations : réduction des prélèvements par la pêche, construction de passes à poissons, soutien des populations par du repeuplement, etc. Pourtant, les stocks demeurent bas sur de nombreuses rivières comme la Susquehanna. De bons niveaux d'abondance semblent toutefois se maintenir sur certaines rivières comme la Connecticut, et paraissent même en augmentation sur d'autres rivières comme la Potomac ou la Rappahannock (Latour et al., 2012). (<http://www.chesapeakebay.net>).

Sur la côte Ouest des États-Unis, l'espèce a été introduite en 1871 dans les rivières Sacramento et Columbia. Elle s'est très fortement développée à partir des années 1960 et des inquiétudes sont apparues concernant ses impacts sur les autres populations piscicoles comme les salmonidés (Hasselman et al., 2012 ; Hinrichsen et al., 2013).

Tableau 1-1 Principales caractéristiques biologiques de l'alose européenne (*Alosa alosa*) et de l'alose américaine (*Alosa sapidissima*) d'après Baglinière et Elie (2000) ; MacKenzie et al. (1985), Limburg et al. (2003), et Greene K.E. (2009).

PARAMÈTRE	ALOSE EUROPÉENNE (<i>ALOSA ALOSA</i>)	ALOSE AMÉRICAINNE (<i>ALOSA SAPIDISSIMA</i>)
Longueur moyenne (cm)	45 - 70	35 - 55
Masse moyenne (kg)	1,5 - 3,5	1 - 3
Migration : température de l'eau (°C)	10 - 15	13 - 20
Périodes de migration	Février - juin	La période varie en fonction de la température. Elle s'étend de novembre en Floride jusqu'à juin au Québec
Reproduction : période	Mai - août	La période varie en fonction de la température. Elle s'étend de janvier en Floride jusqu'à juillet au Québec
Itéroparité (reproducteurs multiples)	Faible (<2 %)	Faible au sud (0 % en Floride) et augmente vers le nord (70 % au Nouveau-Brunswick, Canada) Peut frayer jusqu'à 6 fois dans sa vie

1.3 CADRE ET OBJECTIFS

La plupart des cours d'eau colonisés en France et en Europe par l'alose européenne (*Alosa alosa*) sont fragmentés par des obstacles (hydroélectricité, navigation, moulin, seuil de stabilisation, etc.) qui exercent des impacts sur les populations, en empêchant les individus de parvenir sur les habitats les plus fonctionnels pour la reproduction et la croissance des juvéniles.

Le franchissement des obstacles à la montaison constitue un enjeu de première importance pour la gestion et la restauration des populations d'alose européenne. La dévalaison n'a pas été abordée dans le présent travail. En effet, la quasi-totalité des adultes d'alose vraie (*Alosa alosa*) meurt après la reproduction et les impacts subis par les alosons au passage des turbines sont, a priori, limités du fait de leur petite taille et des caractéristiques des aménagements hydroélectriques. Les ouvrages hydroélectriques sur leur parcours sont en outre moins nombreux que pour d'autres espèces qui migrent plus en amont (notamment les salmonidés).

Les connaissances sur l'impact des ouvrages sur l'alose européenne, son comportement au niveau des obstacles et dans les dispositifs de franchissement, sont parcellaires. Elles sont plus nombreuses aux États-Unis pour l'alose savoureuse, en particulier sur la côte Est. Il est ainsi apparu important de réaliser un bilan des retours d'expérience français, européens et américains afin d'actualiser les connaissances et les critères de conception actuellement utilisés pour le dimensionnement des passes à poissons pour l'alose européenne.

C'est avec cet objectif, dans le cadre du programme LIFE09 NAT/DE/000008, que l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) a mandaté WSP pour :

- réaliser une synthèse des connaissances sur l'efficacité des différents dispositifs de franchissement utilisés en France et en Europe pour la grande alose;
- dresser un bilan des connaissances et des expériences concernant l'efficacité des dispositifs de franchissement pour l'alose savoureuse (voyage d'étude sur la côte Est des États-Unis du 18 au 29 mai 2015);
- rédiger un document de synthèse présentant, en l'état actuel des connaissances, les principales recommandations à prendre en compte afin de réduire l'impact des obstacles et optimiser l'efficacité des dispositifs de franchissement à la montaison.

Le présent document constitue le rapport de synthèse.

2 FACTEURS BIOLOGIQUES ET COMPORTEMENT MIGRATOIRE DE L'ALOSE

2.1 CAPACITÉ DE NAGE

Les aloses ne sont pas capables de sauter et sont ainsi obligées de franchir les obstacles par la nage.

Elles sont considérées comme de bonnes nageuses même si leurs capacités sont nettement inférieures à celles des salmonidés grands migrateurs, aussi bien en termes de vitesse que d'endurance.

Pour l'alose européenne (*Alosa alosa*), il apparaît que les poissons sont capables de soutenir des vitesses variant de 3,1 m/s à 4,7 m/s pendant une durée voisine de 6 - 7 secondes, à une température de 16 - 17 °C (Litaudon, 1985). Les vitesses maximales observées sont comprises entre 4,1 et 6,1 m/s. Ainsi, des écoulements de 2 m/s sur quelques dizaines de mètres constituent une difficulté très importante pour l'espèce (C.T.G.R.E.F., 1981). En France, dans le cadre de l'expertise de la franchissabilité des ouvrages, il a été finalement retenu des vitesses maximales comprises entre 3,5 m/s et 5 m/s, qui prennent en compte la variabilité dans les tailles, l'état physiologique des poissons, ou la température de l'eau (Baudoin et al., 2014).

Pour l'alose américaine (*Alosa sapidissima*), les observations de Weaver (1965) et Haro et al. (2008) ont révélé que les poissons étaient capables de franchir plus de 6 m dans des vitesses d'écoulement de 4,15 m/s et 5 m en moyenne dans un écoulement de 4,5 m/s. D'après Castro-Santos (2005), leur vitesse maximale de nage peut atteindre 5 à 10 fois leur longueur de corps par seconde pour des durées respectives de 5 secondes et 2 à 3 secondes.

2.2 COMPORTEMENT MIGRATOIRE

Seules seront présentées ci-après les informations en lien plus ou moins direct avec le franchissement des obstacles. Elles sont issues en partie des publications de Larinier et Travade (2002) et Haro et al. (2012).

Les aloses sont des poissons qui se déplacent en bancs. La dislocation des bancs peut être problématique pour la poursuite de la migration, en particulier dans les dispositifs de franchissement, lorsque leurs dimensions sont réduites ou les écoulements peu adaptés (zones de recirculation, virages, etc.) (Haro et al., 2001). Cela peut expliquer le comportement de l'alose dans les passes, qui se caractérise souvent par de fréquents allers et retours pouvant se traduire par la dévalaison de bancs entiers.

C'est en pleine journée que l'activité migratoire en cours d'eau et au pied des obstacles est la plus importante (Baglinière et Elie, 2000). Les aloses se présentent après le lever du soleil et quittent les sites en début de soirée pour se replier dans un pool aval (Barry et al., 1982 ; Steinbach et al., 1986 ; Moser et al., 2000 ; Grote et al., 2014). De même, la très grande majorité des entrées et des franchissements dans les passes à poissons sont observés en journée, aussi bien pour l'alose européenne que pour l'alose américaine (Chanseau et al., 2000 ; Haro et Kynard, 1997 ; Sullivan, 2004). Si l'alose se trouve encore dans un dispositif en fin de journée, elle est susceptible de dévaler et d'en ressortir (Sullivan et al., 2002 ; Haro et al., 1997).

Dans ce même ordre d'idée, les poissons apparaissent très sensibles aux variations de luminosité dans les dispositifs, qui peuvent bloquer leur migration vers l'amont.

Ils nagent dans la colonne d'eau, mais pas à proximité immédiate de la surface. Dans le canal de fuite de Lowell sur la rivière Merrimack (côte Est des États-Unis), ALDEN (2011) a montré que la grande majorité des individus se déplace dans des profondeurs variant de 1,5 m à 4,5 m.

Les poissons semblent rechercher les veines d'eau régulières à filets parallèles et éviter les zones tourbillonnaires à forte turbulence et les eaux émulsionnées (remous à l'aval d'une chute, ressaut, aval des turbines) dans lesquelles ils évoluent avec beaucoup de difficultés. Barry et *al.* (1986) indiquent que la présence d'eaux fortement aérées constitue probablement une barrière pour l'alose. Normandeau et Gomez and Sullivan (2011), sur le site de Conowingo sur la Susquehanna (côte Est des États-Unis), notent que les poissons évitent le secteur situé à l'aval immédiat des Kaplan, soumis à de fortes turbulences. Castro-Santos et *al.* (2014) mettent aussi en évidence que les poissons stationnent peu au pied de Gate House (Turners Falls – rivière Connecticut, côte Est des États-Unis) en raison de conditions hydrodynamiques peu favorables. Sur le site de Lowell sur la rivière Merrimack, ALDEN (2011) montre également que les aloses occupent préférentiellement les zones situées en berge dans le canal de fuite d'autant plus que les débits turbinés sont importants (Figure 2-1). Elles transitent par les zones à fortes turbulences en sortie de turbines, mais y stationnent peu.

Un certain nombre d'observations montrent que l'alose demeure facilement piégée dans les encoignures et dans les zones de recirculation. Ces observations ont aussi bien été effectuées sur l'alose américaine aux États-Unis, sur le site de Holtwood sur la Susquehanna en particulier (voir section 4.4), que sur l'alose européenne en France (C.T.G.R.E.F., 1981).

Les observations visuelles sur plusieurs sites ainsi que différentes études de télémétrie ont permis de mettre en évidence que l'activité de prospection des aloses à l'aval des obstacles et leur motivation à franchir les ouvrages étaient inférieures à d'autres espèces comme le saumon. Ainsi, par exemple, pour l'alose américaine, la fréquence des présentations à l'aval des ouvrages paraît assez faible : de l'ordre de quelques fois seulement au cours de la période de migration (Barry et *al.*, 1982 ; Barry et *al.*, 1986 ; ALDEN, 2011 ; Normandeau, Gomez and Sullivan, 2011 ; Normandeau, Gomez and Sullivan, 2012). De plus, les temps de stationnement et de prospection sont limités et varient de quelques heures à quelques jours au maximum (Sprankle, 2005 ; ALDEN, 2011). Au niveau de l'ouvrage de Conowingo sur la Susquehanna, Normandeau et Gomez and Sullivan (2011 ; 2012) mettent en évidence des temps médians de présence très courts compris, selon le devenir des aloses (passage amont ou non), entre 12 min et 36 min.

Pour l'alose européenne, les données sont plus parcellaires et ne concernent que quelques d'individus. Steinbach et *al.* (1986) ont mis en évidence qu'en moyenne, les poissons se sont présentés deux fois devant l'obstacle de Saint-Laurent des Eaux sur la Loire, et ont stationné en moyenne 22 heures en aval immédiat (jusqu'à 500 m en aval de l'obstacle). Sur la Dordogne et la Garonne, au niveau des ouvrages de Golfech, Bergerac et Tuilières, Verdeyroux et *al.* (2015) ont montré que les poissons ne se présentaient que quelques fois seulement au pied des ouvrages (2,1 fois en moyenne) et n'y étaient présents que des temps limités (15,3 heures en moyenne).

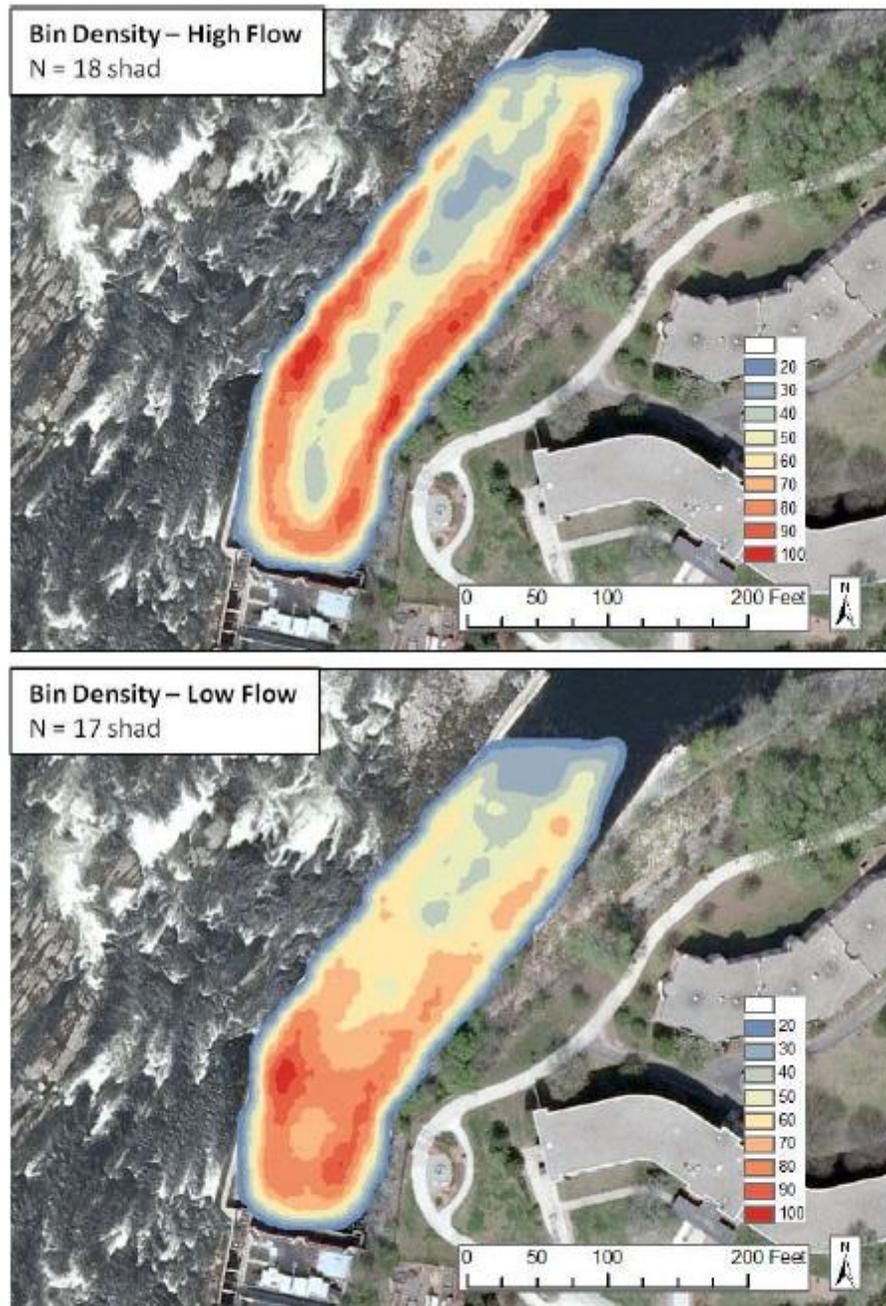


Figure 19. Bin density of 3D positions (distribution) of shad in the Lowell tailrace during periods when tailrace flow was above (top image) and below (bottom image) the mean (4493 cfs) for the study period. Distribution is calculated as a percent of individuals occupying a bin. Bins are delineated in a 10 ft x 10 ft grid throughout the tailrace. Data in inset boxes are means.

Figure 2-1 Exemple de déplacement préférentiel des aloses le long des rives et influence des conditions hydrodynamiques dans le canal de fuite, centrale de Lowell, rivière Merrimack, USA. (ALDEN, 2011).

3 BILANS DES CONNAISSANCES SUR LES PASSAGES D'ALLOSES DANS LES DISPOSITIFS DE MONTAISON

Une synthèse des connaissances concernant les passages d'aloses dans les dispositifs de franchissement, aussi bien aux États-Unis (rivières Connecticut, Merrimack et Susquehanna sur la côte Est, rivière Columbia sur la côte Ouest) qu'en l'Europe (essentiellement en France), est présentée. Cela permet d'amener des éléments concernant les rythmes migratoires des aloses et les paramètres environnementaux (débit et température) lors de la migration. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que ces rythmes sont plus ou moins fortement influencés par l'efficacité des dispositifs de franchissement, la configuration des aménagements, l'hydrologie, etc.

Les principales caractéristiques des obstacles, des dispositifs de franchissement et des passages d'aloses sont présentées sur les planches photos, ainsi que dans les Tableau 3-1 et Tableau 3-2.

Sur la côte Est des États-Unis (rivières Merrimack et Susquehanna, ouvrage de Holyoke sur la rivière Connecticut), les dispositifs de franchissement ne sont en fonctionnement que pendant la journée, généralement de 8 h à environ 20 h, en raison de la migration diurne de l'alose américaine, mais aussi afin de limiter la perte de débits non turbinés et permettre le comptage des poissons. En effet, sur la majorité des sites, les comptages sont réalisés de façon manuelle et en direct par des opérateurs postés devant les vitres de contrôle. La technique vidéo n'est à ce jour utilisée qu'à Turners Falls, Vernon (rivière Connecticut) et York Haven (rivière Susquehanna).

En Europe, 29 stations de contrôle au niveau desquelles des passages d'aloses sont observés ont été répertoriées. Parmi celles-ci, 28 se situent en France et 1 au Portugal sur la rivière Minho (Almeida, com. pers. 2015). Seuls les ouvrages au niveau desquels il existe des migrations significatives sont présentés. Gratton et *al.* (2015) indiquent des passages de quelques dizaines d'individus au maximum par an dans la passe équipant le seuil de Gunnislake sur la rivière Tamar en Grande-Bretagne.

Tableau 3-1 Principales caractéristiques des obstacles et de leur(s) dispositif(s) de franchissement au niveau desquels des passages d'aloses sont comptabilisés sur la côte Est des E.U.

	SITE	DISTANCE À L'OcéAN (KM)	MODULE (M ³ /S)	DÉBIT MOYEN EN MAI (M ³ /S)	DÉBIT MAX. DÉRIVÉ (M ³ /S)	TYPE DE PASSE	NOMBRE ENTRÉES FONCTIONNANT EN 2015	DÉBIT TOTAL DANS LA PASSE (M ³ /S)	ANNÉES DE SUIVI	EFFECTIFS ALOSES		
										Min.	Moy.	Max.
Susquehanna	Conowingo	16	1 165	1 365	2 400	Ascenseur	2 ¹	8,5	1997 - 2015	8 341	58 113	193 574
	Holtwood Usine	39	1 090	1 280	1 700	Ascenseur	2	17	1997 - 2015	21	20 099	109 976
	Holtwood Déversoir					Ascenseur	1	5,7				
	Safe Harbor	50	1 060	1 245	3 200	Ascenseur	2	17	1997 - 2015	8	15 324	89 816
	York Haven	88	980	1 150	480 ²	Passe à bassins (chicane)	1	7,5	2000 - 2015	0	1 929	16 200
Merrimack	Lawrence	48	245	355	210	Ascenseur	1	3,5	1983 - 2015	1 205	25 550	86 857
	Lowell Usine	70	225	330	215	Ascenseur	1	3,5	1989 - 2015	383	4 647	17 310
Connecticut	Holyoke Usine	139	505	680 ³	235	Ascenseur	2	6,8	1967 - 2015	19 000	259 901	720 000
	Holyoke Déversoir					Ascenseur	1	5,7				
	Turners Falls Centrale Cabot	198	395	540	390	Passe à bassins (Ice Harbor)	1	10,5	1980 - 2015	11	14 773	60 089
	Turners Falls Gate House				500	Passe à bassins (2 fentes)	2	14,3				
	Turners Falls Déversoir				Déversoir de crue	Passe à bassins (Ice Harbor)	1	9				
	Vernon	228	365	500	485	Passe à bassins (Ice Harbor + chicane)	1	7,3	1981 - 2015	9	7 265	39 791
Bellow Falls	280	295	465	410	Passe à bassins (1 fente)	1	2,3	44 aloses en 2015				

1 Une seule en fonctionnement selon l'opération des groupes de l'usine.

2 La passe est située dans un bras de la Susquehanna alimenté par un débit minimum de 57 m³/s.

3 Un canal situé en amont immédiat de l'usine permet de dériver un débit jusqu'à 190 m³/s.

Tableau 3-2 Caractéristiques des obstacles et de leur(s) dispositif(s) de franchissement au niveau desquels des passages d'aloses sont comptabilisés en Europe.

PAYS	RIVIÈRE	OBSTACLE	DISTANCE À LA MER (KM)	MODULE COURS D'EAU (M ³ /S)	DÉBIT MOYEN EN MAI (M ³ /S)	DÉBIT MAXIMUM TURBINÉ (M ³ /S)	TYPE DE PASSE	DÉBIT PASSE (M ³ /S)	CHUTE INTERNE MAX. (M)	ANNÉES DE SUIVI	PASSAGE		
											Min	Moy	Max
France	Vire	Claies de Vire	28,4	13	7,5	-	Bassins (fentes)	1,1	0,35	2002 - 2015	1 728	4 154	8 895
France	Orne	Feuguerolles - Bully	33	23	16	-	Ralentisseurs (suractifs) jusqu'en 2010 puis Bassins (fente)	1,7	0,25	1994 - 2015	5	121	499
France	Seine	Poses	156,5	479	522	150	Bassins (fente)	4 - 6,5	0,25	2008 - 2012	950	2 112	3 870
France	Vilaine	Arzal	8	75	50	-	Bassins	2	0,3	1996 - 2015	38	1 135	4 242
France	Aulne	Chateaulin	35	25	16	-	Bassins (fente)	2	0,3	2009 - 2015	179	1 318	2 891
France	Vienne	Chatellerault	270	110	115	100	Bassins (fentes)	1,5	0,3	2004 - 2015	135	2 427	9 538
France	Creuse	Descartes	260	75	87	80	Bassins (fentes)	2	0,3	2007 - 2015	3	1 671	9 050
France	Loire	Decize	576	135	155	160	Bassins (fentes)	2	0,3	1998 - 2015	6	3 859	15 273
France	Allier	Vichy	674	96	133	-	Bassins (fente)	3	0,25	1998 - 2015	3	567	3 067
France	Charente	Crouin ¹	100	46	46	-	Bassins (fente)	2	0,25	2010 - 2015	1 476	3 916	6 038
France	Garonne	Golfech	270	395	590	540	Ascenseur	5	-	1987 - 2015	429	29 439	106 706
France	Garonne	Bazacle	370	190	346	80	Bassins (fente)	3	0,3	1993 - 2015	0	3 411	20 546
France	Dordogne	Tuilières	200	270	284	320	Ascenseur (+ Bassins - fente)	2,5 - 4,5	0,3	1989 - 2015	21	26 536	87 254
France	Dordogne	Mauzac	215	260	272	280	Bassins (fente)	3 - 4	0,3	1992 - 2015	0	6 572	50 000
France	Pau	Puyoo	60	81	121	29	Bassins (fentes)	2	0,3	1996 - 2002	45	419	1 050
Portugal	Mondego	Açude Ponte	30	98	39	-	Bassins (fentes)	2 - 2,5	0,25	2013 - 2015	966	4 277	7 503

3.1 EFFECTIFS CONTRÔLÉS ET TENDANCES

Sur la Connecticut (voir Figure 3-1), les migrations sont suivies au niveau du premier ouvrage de Holyoke depuis 1967. Après une augmentation progressive des effectifs contrôlés jusqu'au début des années 1990 pour atteindre un maximum de 720 000 individus en 1992, les passages ont fortement diminué par la suite. Ils ont varié jusqu'au début des années 2010 entre 116 000 et 370 000 poissons. Ces toutes dernières années, une légère augmentation semble se dessiner. Plus en amont, les contrôles ont démarré au début des années 1980. Ils paraissent très variables et sans lien direct avec le nombre d'individus comptabilisés à Holyoke. À Turners Falls et à Vernon, les effectifs comptabilisés sont compris respectivement entre 1 500 et 50 000 et entre 100 à 30 000 individus en moyenne par an. (http://www.fws.gov/r5crc/pdf/Select_Fish_Passage_Summary_Count_Data.pdf)

Sur la Merrimack (voir Figure 3-2), les comptages sont réalisés depuis 1983 au niveau de l'ouvrage de Lawrence, premier obstacle rencontré par les poissons. Après une augmentation des remontées à la fin des années 1990 pour atteindre des effectifs de l'ordre de 80 000 individus en 2001, les effectifs ont ensuite progressivement diminué pour se stabiliser entre 10 000 et 35 000 individus, sans présenter de tendance particulière à l'augmentation ou la baisse. À Lowell, plus en amont, les suivis ont débuté en 1989. Les effectifs sont très nettement inférieurs à ceux observés à Lawrence même si l'évolution des passages est comparable. Les passages observés en 2015 sur les deux sites (Lawrence et Lowell) sont les plus importants depuis le début des suivis avec respectivement 86 857 et 17 310 poissons au 2 juillet 2015 (MRTC, 1997 ; ALDEN, 2011). (<http://www.fws.gov/northeast/cnefro/returns.html>)

Sur la Susquehanna (voir Figure 3-3), le contrôle des migrations au niveau du premier obstacle de Conowingo a débuté en 1991. Après une augmentation marquée des effectifs jusqu'au début des années 2000 (environ 200 000 poissons en 2001), les remontées ont fortement baissé depuis. Elles représentent seulement une dizaine de milliers d'individus ces dernières années. Plus en amont, les comptages sont effectués depuis 1997 à Holtwood et Safe Harbor. Une évolution comparable à celle de Conowingo est observée. Quelques milliers de poissons seulement franchissent les ouvrages ces dernières années. À l'image de ce qui est observé plus en aval, les effectifs à York Haven présentent une diminution depuis le début des suivis en 2000. Ils ne représentent que quelques centaines de poissons tout au plus ces dernières années. (http://fishandboat.com/shad_susq.htm)

Sur la Columbia (voir Figure 3-4), les passages enregistrés au barrage de Bonneville, premier obstacle rencontré par les poissons sur la rivière Columbia, situé à environ 235 km de l'océan, sont importants et la chronique de suivi particulièrement longue. Les comptages, qui ont démarré en 1938, mettent en évidence une augmentation progressive et constante des effectifs d'alose depuis le début des années 1960 jusqu'au début des années 2000, avec un pic de plus de 5 millions d'individus en 2004, puis une stabilisation des passages par la suite (entre 1 et 4 millions selon les années). (<http://www.nwp.usace.army.mil/Missions/Environment/Fish/Counts.aspx>)

En France, les informations disponibles sont assez hétérogènes selon les bassins.

En ce qui concerne les quatre principaux bassins colonisés par l'espèce :

- sur le bassin de l'Adour, la population n'est pas bien connue en raison de l'absence de station de contrôle positionnée suffisamment en aval. Son état est jugé toutefois préoccupant depuis plus d'une décennie (COGEPOMI, 2015) ;
- sur le bassin Garonne – Dordogne (voir Figure 3-5), les suivis réalisés depuis plus de 25 ans au niveau des dispositifs équipant les ouvrages de Tuilières sur la Dordogne et de Golfech sur la Garonne révèlent, après une forte augmentation des effectifs jusqu'à la fin des années 1990 (jusqu'à

193 000 aloses en 1996 au total sur les deux stations), une diminution très marquée pour atteindre seulement quelques centaines d'individus à la fin des années 2000. La population, longtemps considérée comme la plus importante d'Europe, est maintenant dans une situation particulièrement difficile ;

- sur le bassin de la Loire (voir Figure 3-6), 4 stations (Descartes sur la Creuse, Châtelleraut sur la Vienne, Vichy sur l'Allier et Decize sur la Loire) situées à des distances variables de l'océan et sur différents cours d'eau, permettent d'appréhender l'évolution de la population. Les effectifs contrôlés annuellement sont variables et sont compris entre quelques individus seulement et 15 000 environ. Globalement, il apparaît une augmentation des passages au milieu des années 2000 puis une nette diminution par la suite. Depuis le début des années 2010, ils demeurent faibles et stables ;
- sur le Rhin, la population, qui avait quasiment disparu, paraît augmenter ces toutes dernières années. Les effectifs contrôlés à Iffezheim et Gambenheim, situés à plus de 600 km de l'océan, sont en effet passés de quelques individus par an seulement, à plus de 150 en 2014. Des poissons ont été également observés sur des affluents comme la Moselle et la Neckar. Ces résultats sont très probablement à mettre en relation avec le plan de restauration de l'espèce (et les repeuplements associés) lancé dans le cadre du programme Life (Scharbert et al., 2011).

En ce qui concerne les axes migratoires de dimensions plus modestes :

- sur le bassin de la Charente, les effectifs contrôlés à la station vidéo de Crouin, située à une centaine de kilomètres de l'océan, qui regroupent à la fois la grande alose (*Alosa alosa*) et l'aloise feinte (*Alosa fallax*), varient de 1 500 à 6 000 individus par an. Les difficultés de distinguer les deux espèces et le faible nombre d'années de suivi (à partir de 2010) ne permettent pas réellement pour l'heure de déterminer une tendance; (<http://www.migrateurs-charenteseudre.fr>)
- sur les cours d'eau normands et bretons (voir Figure 3-7), quatre d'entre eux accueillent des populations significatives et disposent de chroniques de suivis conséquentes. Sur la Vilaine, à Arzal, les effectifs, qui varient annuellement entre quelques dizaines d'individus et un peu plus de 4 000 poissons, ont augmenté sensiblement dans les années 2000. Pendant une décennie, les effectifs sont restés stables puis une baisse marquée des remontées a été observée ces toutes dernières années. Sur l'Orne, les effectifs ont fortement augmenté au milieu des années 2000. Ils semblent s'être stabilisés depuis à des niveaux d'abondance de l'ordre de quelques centaines de poissons. Sur la Vire, une tendance à l'augmentation des remontées apparaît clairement. De moins de 2 000 individus au début des années 2000, les effectifs observés en 2015 approchent les 9 000 poissons. Il s'agit du seul cours d'eau en France où les effectifs contrôlés augmentent ces dernières années. (<http://www.peche-manche.com>) (<http://www.federationpeche.fr/14>) (<http://www.eptb-vilaine.fr>) (<http://www.observatoire-poissons-migrateurs-bretagne.fr>)

En dehors de la France, des comptages sont réalisés à notre connaissance uniquement sur la rivière Mondego au Portugal, sur le barrage de Açude-Ponte à Coimbra. La chronique est faible et ne permet pas de déterminer une tendance. Les effectifs comptabilisés ont été de 7 503, 4 364 et 966 respectivement en 2013, 2014 et 2015 (Almeida, com. pers. 2015).

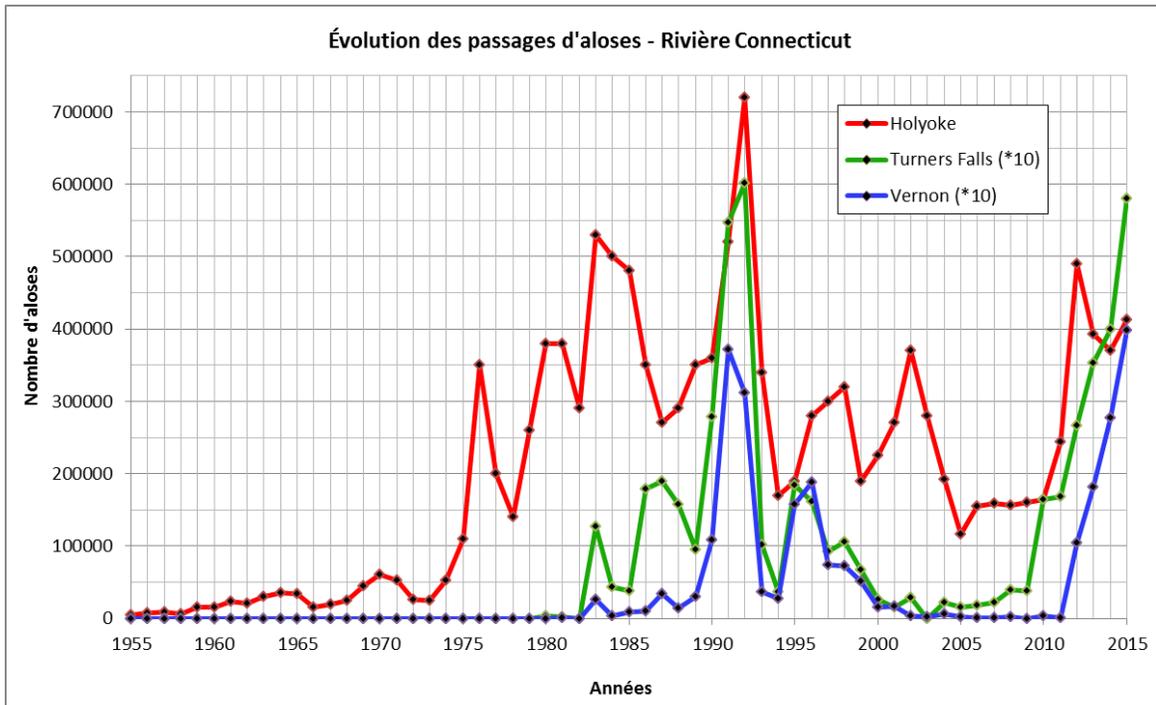


Figure 3-1 Évolution des passages d'aloses au niveau des ouvrages de Holyoke, Turners Falls (Gate House) et Vernon sur la rivière Connecticut de 1955 à 2015.

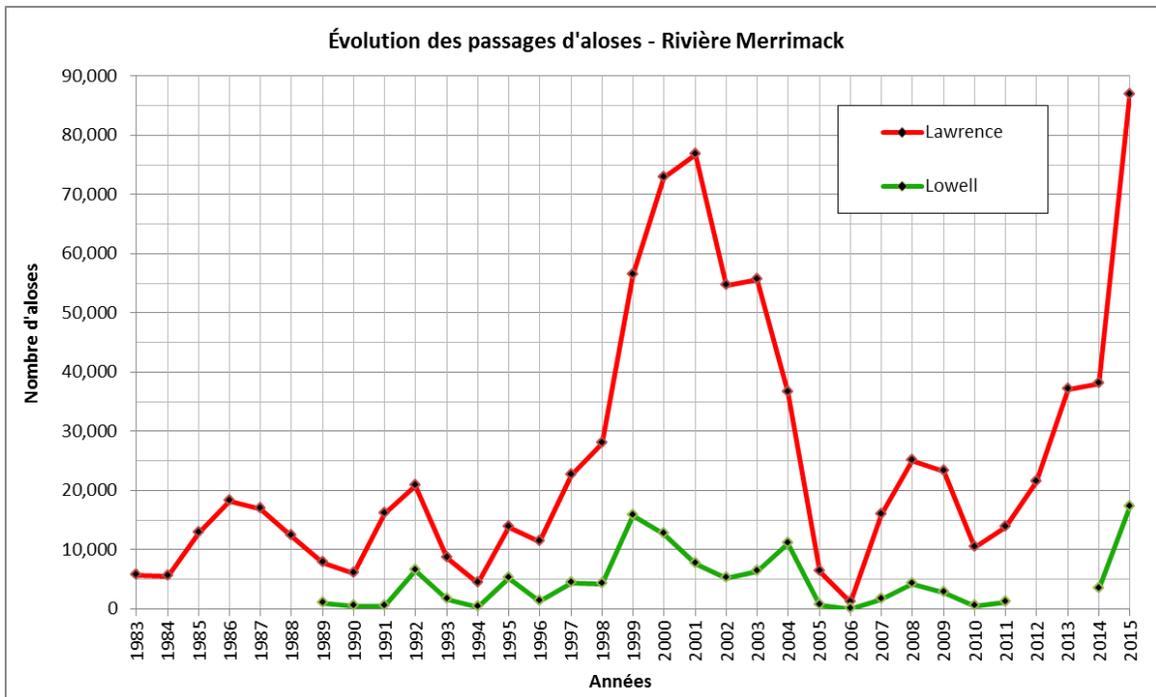


Figure 3-2 Évolution des passages d'aloses au niveau des ouvrages de Lawrence et Lowell sur la rivière Merrimack de 1983 à 2015.

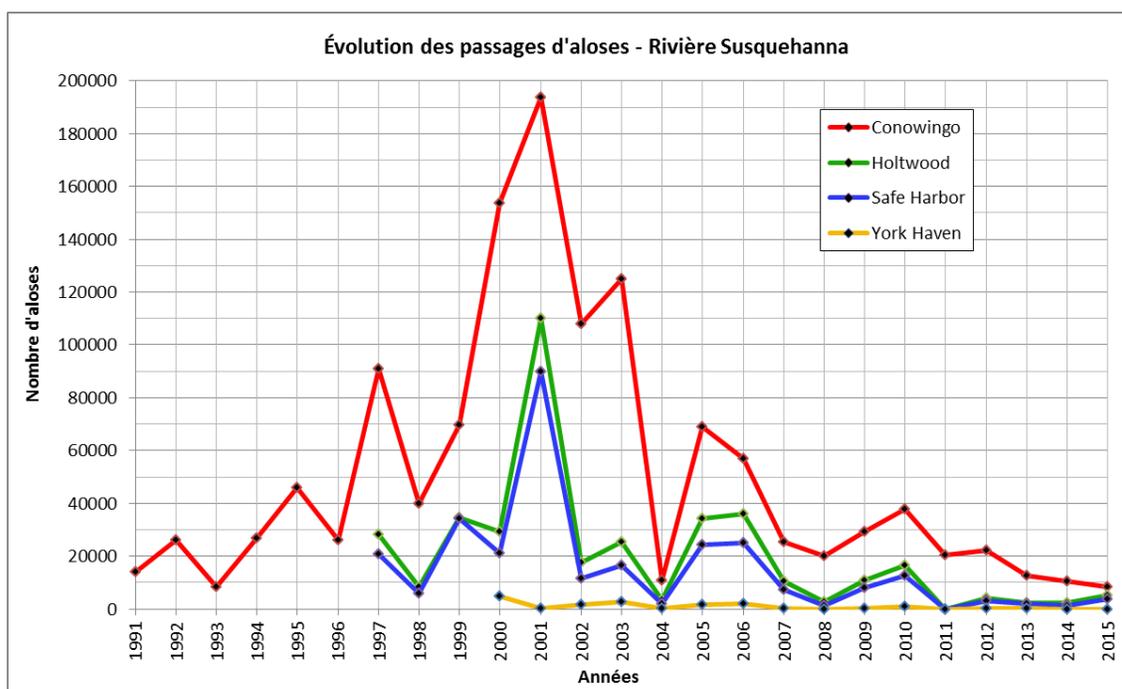


Figure 3-3 Évolution des passages d'aloses au niveau des ouvrages de Conowingo, Holtwood, Safe Harbor sur la rivière Susquehanna de 1991 à 2015.

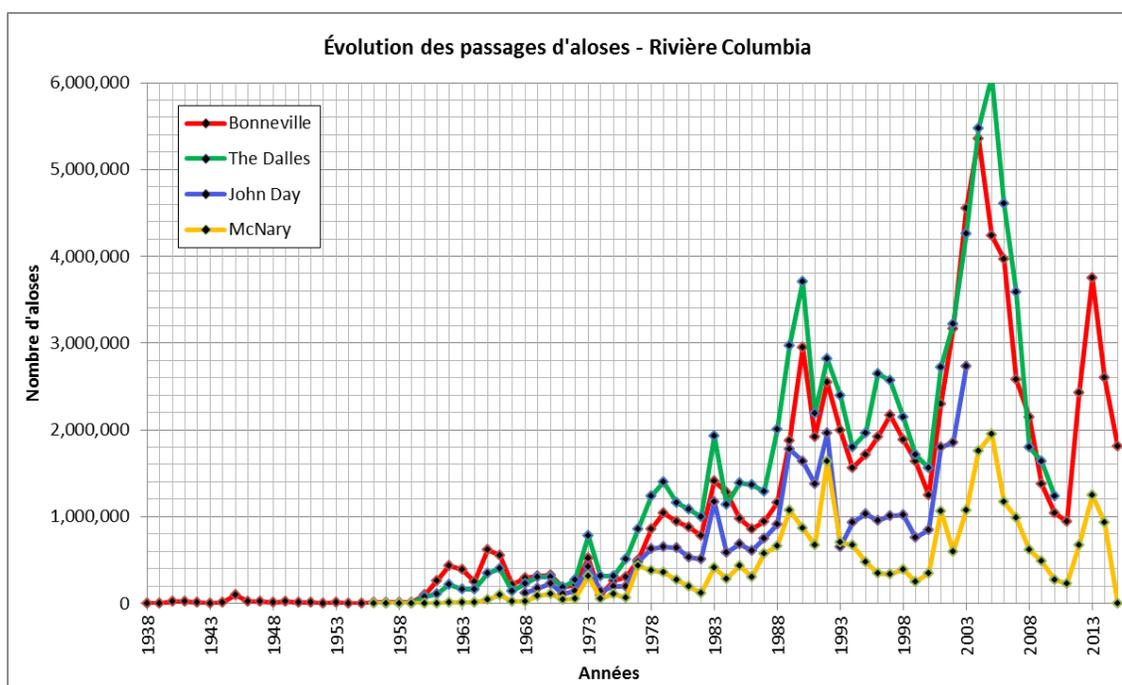


Figure 3-4 Évolution des passages d'aloses au niveau des ouvrages de Bonneville (km 235), The Dalles (km 308), John Day (km 347) et McNary (km 470) sur la rivière Columbia de 1938 à 2015 (NB : des passages conséquents, non connus, ont lieu par l'écluse de navigation de Bonneville).

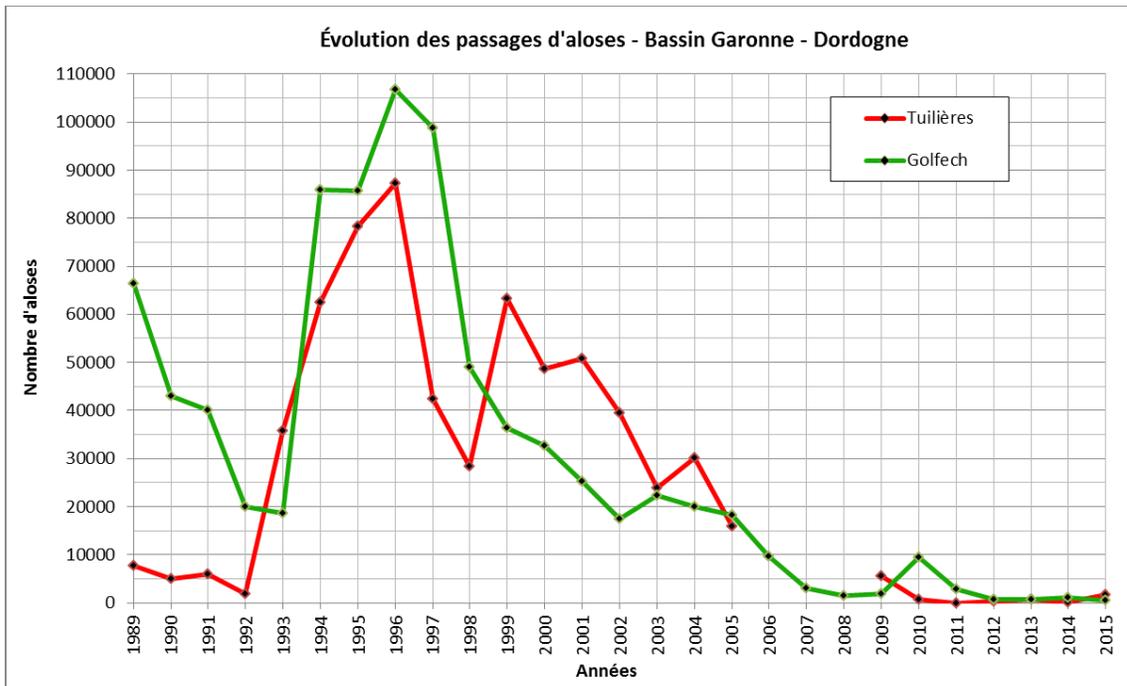


Figure 3-5 Évolution des passages d'aloses dans le bassin Garonne-Dordogne entre 1989 et 2015.

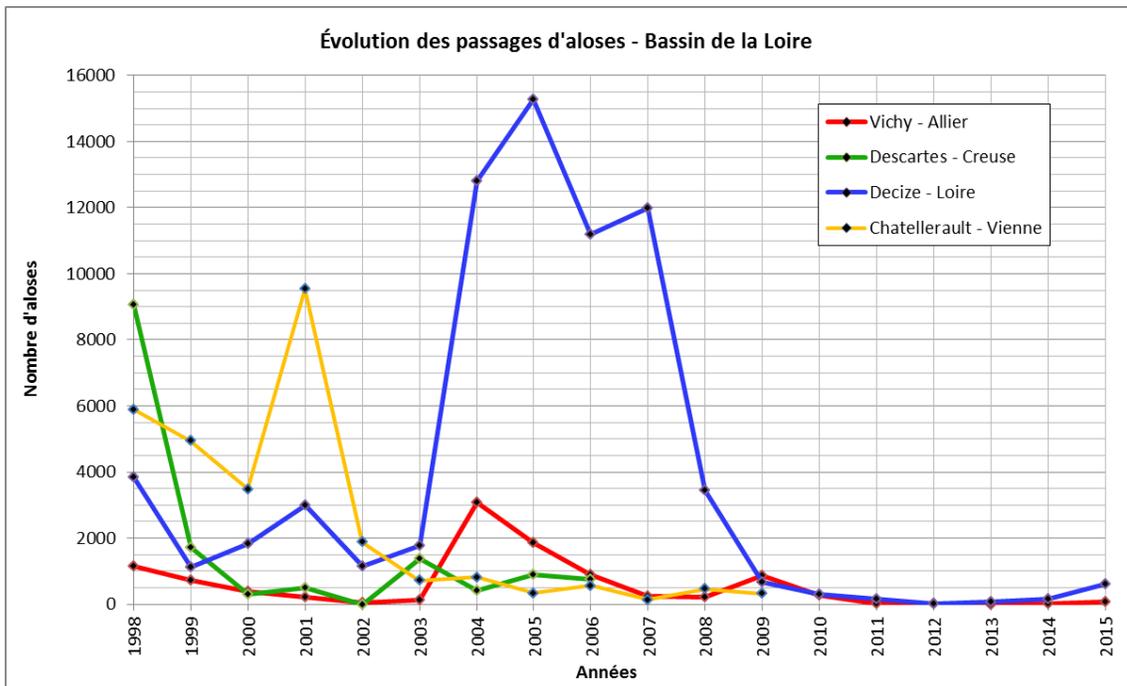


Figure 3-6 Évolution des passages d'aloses dans le bassin de la Loire entre 1998 et 2015.

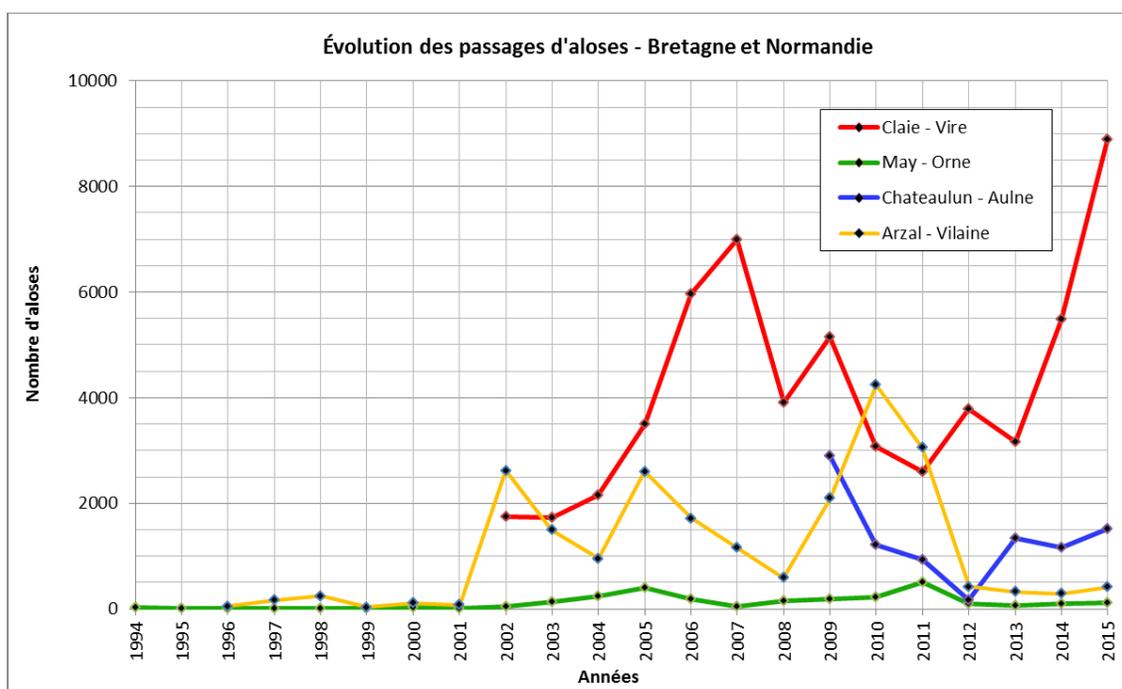


Figure 3-7 Évolution des passages d'aloses en Bretagne et Normandie entre 1994 et 2015.

3.2 PÉRIODES, DÉBITS ET TEMPÉRATURES

Sur la Connecticut, à Holyoke, les migrations se concentrent essentiellement au mois de mai, sur des périodes de 30 à 40 jours. Elles se déroulent pour des débits moyens correspondant entre 120 % et 150 % du module du cours d'eau. Les températures de l'eau préférentielles sont comprises entre 16°C et 21°C (Leggett et al., 1972).

Sur la Merrimack, les analyses réalisées à Lawrence révèlent des résultats assez comparables à ceux observés à Holyoke : la plus grande partie des migrations s'effectue durant le mois de mai, sur une période d'une quarantaine de jours, pour des débits moyens correspondant à des valeurs proches du module du cours d'eau. La majorité des passages se produit pour des températures de l'eau comprises entre 13 - 14°C et 21°C à Lowell (Sprankle, 2005).

Sur la Susquehanna, les observations sont très comparables à celles réalisées sur les deux précédents cours d'eau. La plus grande partie des migrations s'effectue en mai, sur une période de 30 à 40 jours, durant laquelle les débits représentent en moyenne 130 % à 140 % du débit moyen annuel. Les températures de l'eau sont comprises entre 13 - 14°C et 21°C (Normandeau et Gomez and Sullivan, 2011 et 2012).

Tableau 3-3 Rythmes de migration des aloses au niveau des premiers ouvrages aval de Holyoke (Connecticut), Lawrence (Merrimack) et Conowingo (Susquehanna).

RIVIÈRE	PÉRIODE	EFFECTIF MOYEN	PÉRIODE MIGRATION	MIGRATION (90 % DES PASSAGES)		
				PÉRIODE	NOMBRE DE JOURS	DÉBIT MOYEN EN M ³ /S ET (% MODULE)
Susquehanna (Conowingo)	2002-2015	47,439	Avril - mi-juillet	Mi-avril - 3 ^e sem. mai	36	1 630 (140 %)
	2003 (max)	125,135	Mi-avril – 1 ^{ère} sem. juin	4 ^e sem. avril - 3 ^e sem. mai	30	1 515 (130 %)
Merrimack (Lawrence)	1983-1996	11,448	Mai - juillet	14 mai - 24 juin	42	258 (114 %)
	1992 (max)	20,796	9 mai - 31 juillet	15 mai - 22 juin	39	223 (99 %)
Connecticut (Holyoke)	1983-1992	439,816	Avril - août	5 mai - 16 juin	43	658 (134 %)
	2012-2015	416,640	Avril - juillet	5 mai - 6 juin	33	737 (150 %)
	1992 (max)	721,764	Avril - juillet	9 mai - 5 juin	28	595 (121 %)

Sur la Columbia (côte Ouest), les fenêtres de migration de l'aloise sont, comme sur la côte Est, réduites. Sur la dernière décennie 2006 - 2015, durant laquelle plus de 22 millions d'aloses sont passés en amont de Bonneville, 90 % d'entre elles ont franchi l'ouvrage sur des périodes de 40 à 50 jours selon les années, essentiellement durant le mois de juin (voir Figure 3-8). Sur la base des données récupérées sur le site gouvernemental <http://www.cbr.washington.edu/dart/>, il apparaît que la grande majorité des passages se déroulent pour des débits compris entre 90 % et 210 % du débit moyen annuel et pour des températures de l'eau comprises entre 14°C et 19,5°C. Ce dernier résultat est peu différent des propos de Leggett et *al.* (1972).

En Europe, globalement, il apparaît des résultats très comparables à ceux observés pour l'aloise américaine. Les migrations au niveau des obstacles sont de courtes durées, la majorité des passages sur les différents sites se produisant sur des périodes de 40 à 50 jours au maximum.

Tableau 3-4 Rythmes de migration des aloses au niveau des principales stations de contrôle en France.

COURS D'EAU	OBSTACLE	ANNÉE DE SUIVI	90% PASSAGE
Claies de Vire	Vire	2002 - 2015	fin avril à fin mai
Orne	Feuguerolles - Bully	1994 - 2015	mi-avril à mi-mai
Seine	Poses	2008 - 2012	--
Vilaine	Arzal	1996 - 2015	avril à mi-mai
Aulne	Chateaulin	2009 - 2015	mi-avril à mi-mai
Vienne	Chatellerault	2004 - 2015	fin avril à mi-juin
Creuse	Descartes	2007 - 2015	mi-avril - mi-juin
Loire	Decize	1998 - 2015	mi-avril à fin mai
Allier	Vichy	1998 - 2015	mai à début juin
Charente	Crouin ¹	2010 - 2015	mai à mi-juin
Garonne	Golfech	1987 - 2015	mai à juin
Garonne	Bazacle	1993 - 2015	mi-mai à mi-juillet
Dordogne	Tuilères	1989 - 2015	mai à juin
Dordogne	Mauzac	1992 - 2015	mi-mai à juin
Pau	Puyoo	1996 - 2002	avril à mai

¹ Les effectifs comptabilisés correspondent à des grandes aloses (*Alosa alosa*) et des aloses feintes (*Alosa fallax*).

A titre d'exemple, les Figure 3-9, Figure 3-10 et Figure 3-11 présentent les rythmes de passage annuels au niveau des ouvrages de Descartes sur la Creuse, Châtellerault sur la Vienne et Arzal sur la Vilaine (Bach et *al.*, 2015 ; Briand et *al.*, 2015).

Sur les ouvrages de Tuilières sur la Dordogne et Golfech sur la Garonne, une synthèse des données recueillies sur la période 1989 - 1999 (Chanseau et *al.*, 2000) met en évidence que les migrations se concentrent sur les trois sites pour des températures de l'eau comprises entre 13 - 14°C et 21 - 22°C. Tous sites confondus, les débits pour lesquels sont observés la très grande majorité des passages sont compris entre le module et deux fois le module du cours d'eau au droit des ouvrages.

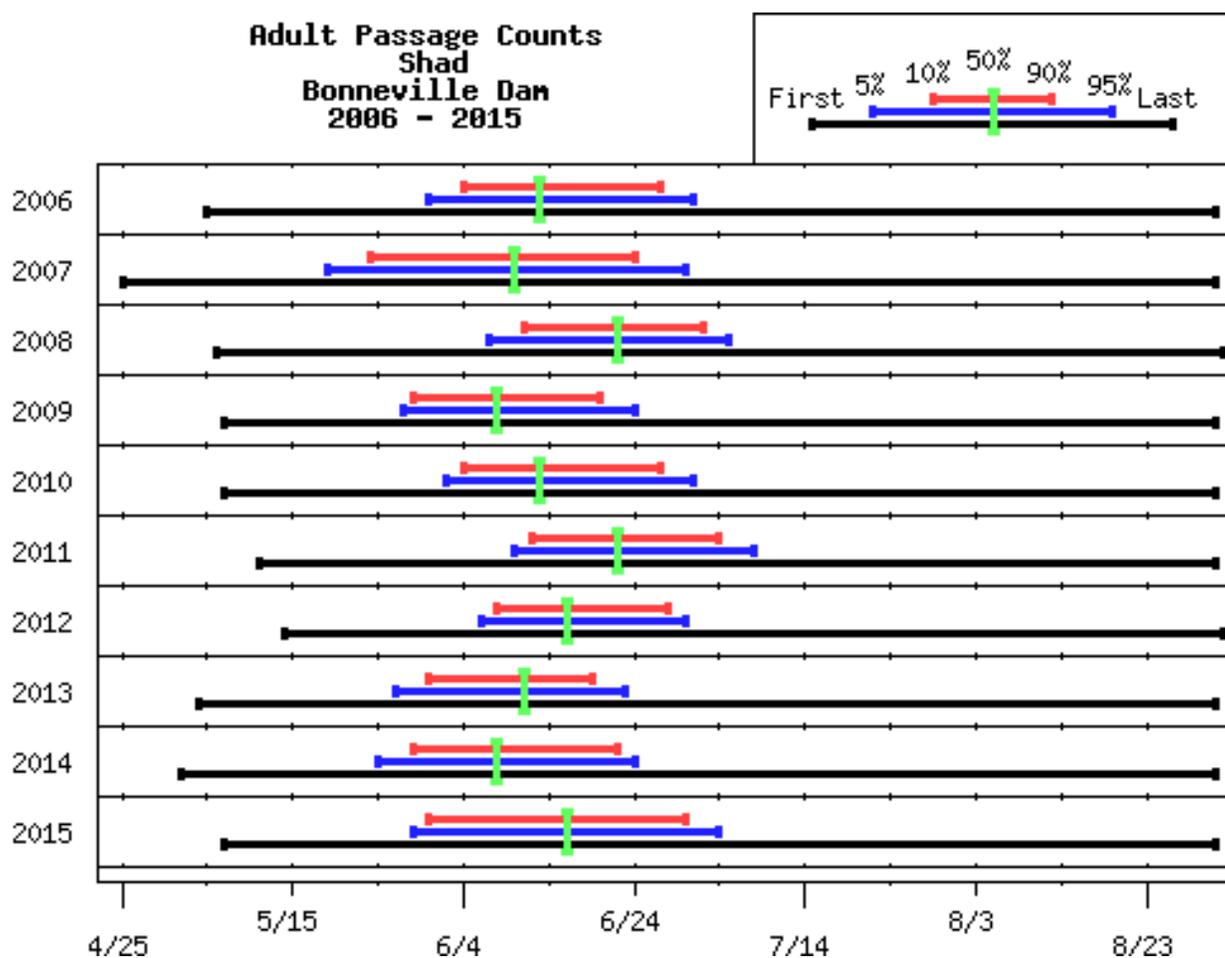


Figure 3-8 Rythmes de migration des aloses au niveau de l'ouvrage de Bonneville sur la rivière Columbia de 2006 à 2015 (source : <http://www.cbr.washington.edu/dart/>).

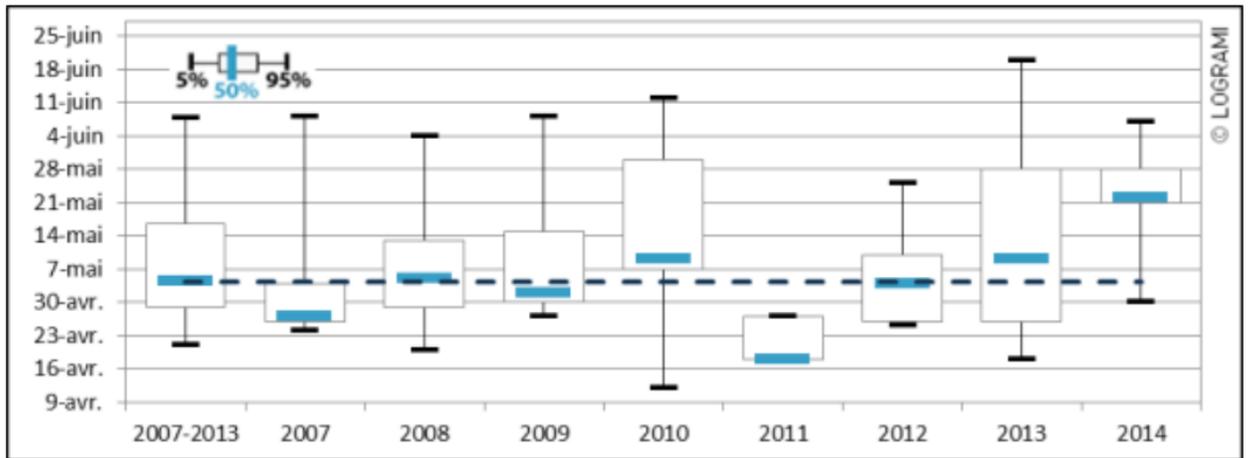


Figure 3-9 Rythmes de migration au niveau de l'ouvrage de Descartes sur la Creuse (France) de 2007 à 2014 (Bach et al., 2015).

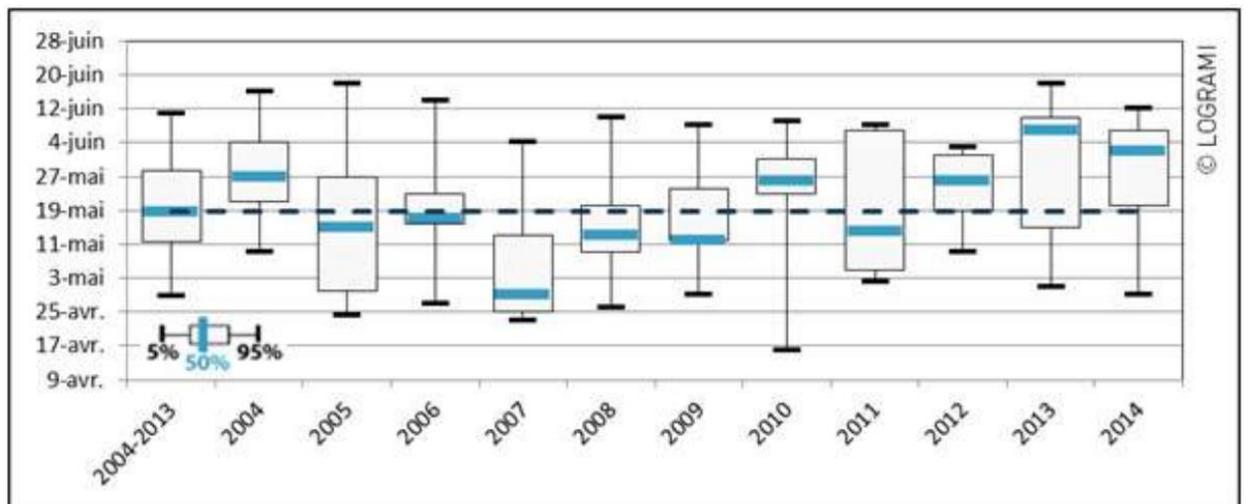


Figure 3-10 Rythmes de migration au niveau de l'ouvrage de Châtelleraut sur la Vienne (France) de 2004 à 2014 (Bach et al., 2015).

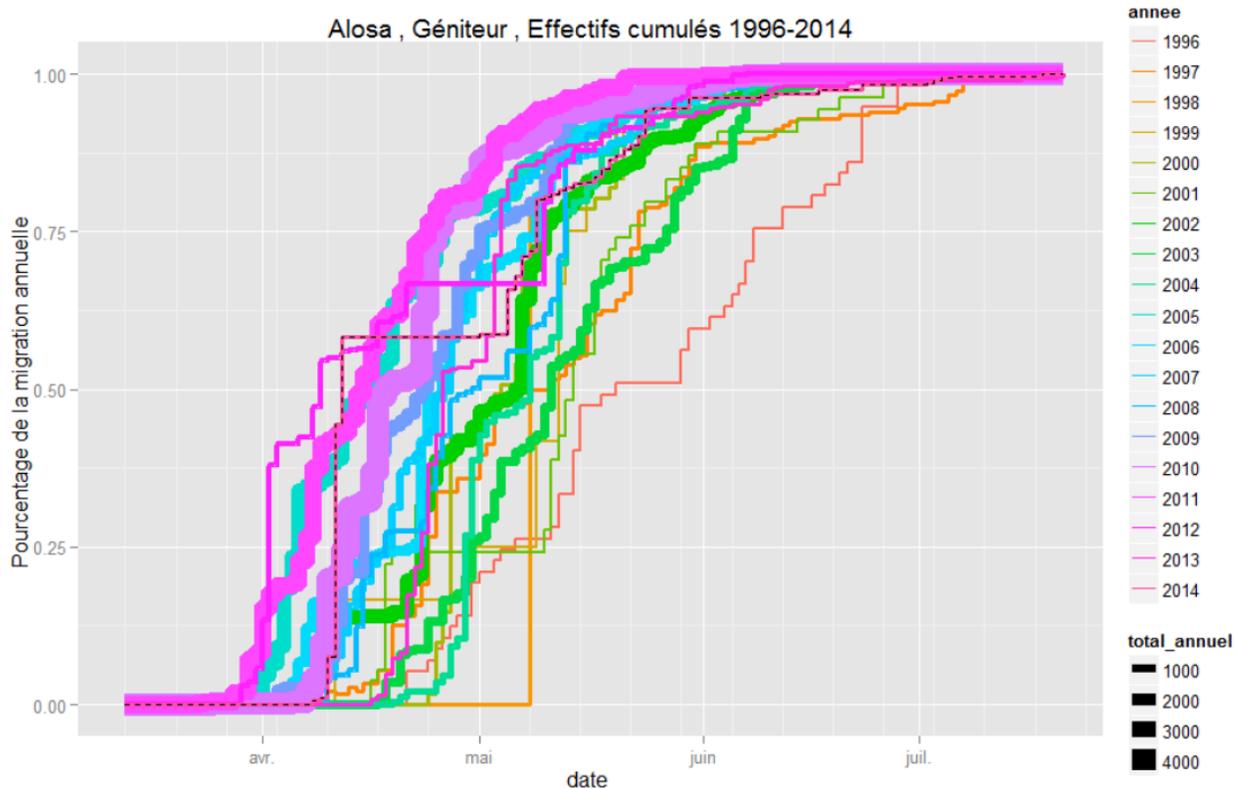


Figure 3-11 Rythmes de migration au niveau de l'ouvrage d'Arzal sur la Vilaine (France) de 1996 à 2014 (Briand et *al.*, 2015).

4 BILAN DES CONNAISSANCES SUR L'EFFICACITÉ DES DISPOSITIFS

4.1 NOTIONS D'EFFICACITÉ D'UN DISPOSITIF

Trois éléments permettent de déterminer l'efficacité d'un dispositif de franchissement :

- **L'attractivité "lointaine"**, c'est-à-dire la capacité des poissons à se présenter dans la zone influencée par les écoulements issus du dispositif, à proximité de(s) l'entrée(s). Elle peut être quantifiée en déterminant le pourcentage des individus qui se présentent dans la zone par rapport au nombre total d'individus en migration au pied de l'obstacle. Cette attractivité "lointaine" dépend en grande partie de la configuration de l'ouvrage, du nombre et de la position des entrées par rapport aux conditions hydrauliques à l'aval de l'aménagement ainsi que du débit d'alimentation du dispositif.
- **L'attractivité "proche"**, c'est-à-dire la capacité des poissons présents dans la zone d'influence de la passe de pénétrer dans le dispositif. Elle peut être quantifiée en déterminant le pourcentage des individus qui pénètrent dans le dispositif par rapport au nombre de poissons présents dans la zone d'influence de la passe. Elle dépend notamment des conditions hydrauliques au voisinage des entrées (débit d'alimentation du dispositif, forme des jets, conditions hydrauliques à l'aval immédiat), des dimensions des entrées, des changements de luminosité, etc.

L'**attractivité "totale"** du dispositif de franchissement englobe l'attractivité "lointaine" et l'attractivité "proche" et peut être quantifiée en déterminant le pourcentage de poissons qui pénètrent dans les dispositifs par rapport au nombre de poissons qui se présentent à l'aval immédiat de l'obstacle. Elle représente l'efficacité maximale potentielle des passes dans la mesure où les poissons ne peuvent franchir les obstacles que s'ils entrent dans les dispositifs ("no fish in, no fish out").

- **La franchissabilité** du dispositif, c'est-à-dire la capacité des poissons qui ont pénétré dans la passe à la franchir dans son intégralité. Elle peut être quantifiée en déterminant le pourcentage de poissons qui sont passés en amont de l'obstacle par rapport au nombre de poissons qui sont entrés dans le dispositif.

L'**efficacité** de l'ouvrage, résultante des trois éléments présentés ci-dessus, peut être quantifiée en en déterminant la proportion de poissons qui parviennent à passer à l'amont par rapport aux individus qui se sont présentés au pied de l'ouvrage.

Seuls les suivis à l'aide de la technique de télémétrie permettent de fournir des informations complètes. Les données disponibles dans les documents consultés n'ont toutefois pas permis de réaliser des analyses détaillées prenant en compte le comportement individuel de chaque poisson, qui auraient été plus riches encore en enseignements.

4.2 TECHNIQUES DE SUIVI

Différentes techniques permettent d'apporter des informations sur les différentes étapes présentées auparavant.

LES COMPTAGES DES POISSONS DANS LES DISPOSITIFS DE FRANCHISSEMENT

Ils permettent d'appréhender la diversité piscicole des cours d'eau, de déterminer et de suivre l'évolution des effectifs et des caractéristiques biométriques des espèces qui franchissent les ouvrages, ainsi que d'appréhender l'influence des conditions environnementales sur les migrations. Isolément, ils ne permettent pas de déterminer l'efficacité des dispositifs ni les durées de blocage ou encore les difficultés rencontrées par les poissons pour franchir les ouvrages. Toutefois, dans le cas où plusieurs obstacles sont érigés sur un même axe migratoire à des distances proches et où ils disposent chacun d'une station de comptage, il est possible de déterminer les **taux de transfert** des poissons entre l'ouvrage aval et l'ouvrage amont. Il devient alors possible d'apprécier les impacts cumulés des différents ouvrages ou d'identifier parfois des dysfonctionnements pour certains dispositifs. Ces **taux de transfert correspondent à des efficacités minimales** des dispositifs de franchissement dans le sens où il est considéré que la totalité des individus ayant franchi l'ouvrage situé à l'aval se présente au niveau de l'obstacle amont et cherchent à le franchir. Cela n'est pas toujours vrai et dépend de nombreux paramètres parmi lesquels la distance entre les ouvrages, la présence de frayères ou d'un affluent entre les aménagements, les conditions environnementales, etc. Dans la même logique, les impacts cumulés des différents ouvrages érigés sur un même axe migratoire correspondent à des valeurs maximales en supposant systématiquement que tous les individus qui se reproduisent à l'aval des ouvrages ont cherché auparavant à les franchir. La détermination de taux de transfert par double comptage est intéressante, car cela permet d'acquérir des informations chaque année et sur de multiples espèces à la fois.

Le Tableau 4-1 présente les taux de transfert entre les ouvrages sur les rivières Connecticut, Merrimack et Susquehanna.

Tableau 4-1 Taux de transfert des aloses entre les différents ouvrages des rivières Susquehanna, Merrimack et Connecticut, côte Est des E.U.

RIVIÈRE	TRONÇON	DISTANCE ENTRE LES OUVRAGES (KM)	PÉRIODE	TAUX TRANSFERT (%)			
				MOYENNE	1 ^{ER} QUARTILE	MÉDIANE	3 ^E QUARTILE
Connecticut	Holyoke - Turners Falls (<i>Cabot + Gate House ou Spillway + Gate House</i>)	59	1983 - 2015	4,7	1,4	3,3	7,2
	Turners Falls - Vernon	30	1983 - 2015	36,9	8,0	31,0	66,0
Merrimack	Lawrence - Lowell	22	1989 - 2015	14,7	9,5	11,6	18,0
Susquehanna	Conowingo - Holtwood	23	1997 - 2015	31,1	19,2	27,5	46,6
	Holtwood - Safe Harbor	11	1997 - 2015	69,1	66,4	72,3	74,0
	Safe Harbor – York Haven	38	2000 - 2015	9,2	2,4	7,3	11,2

Le Tableau 4-2 présente les taux de transfert entre les ouvrages sur la rivière Columbia. À titre de comparaison, les taux de transfert moyens (1^{er} quartile / médiane / 3^e quartile) des saumons chinook entre The Dalles et John Day et entre John Day et Mc Nary sur la même période 1968 - 2003 sont respectivement de 79,4 % (76,7 % / 78,3 % / 82,1 %) et 88,8 % (84,1 % / 87,8 % / 95,5 %). Cela illustre clairement les plus grandes difficultés à assurer une efficacité élevée des passes pour l'aloise par rapport au saumon.

Tableau 4-2 Taux de transfert des aloses entre les ouvrages de The Dalles, John Day et Mc Nary sur la rivière Columbia, côte Ouest des E.U.

RIVIÈRE	TRONÇON	DISTANCE ENTRE LES OUVRAGES (KM)	PÉRIODE	TAUX TRANSFERT (%)			
				MOYENNE	1 ^{ER} QUARTILE	MÉDIANE	3 ^E QUARTILE
Columbia	The Dalles – John Day	23	1968 - 2003	52,4	46,0	52,5	57,7
	John Day – Mc Nary	11	1968 - 2003	51,4	37,6	48,2	60,6

Pour l'alose européenne, il n'y a que sur l'axe Dordogne qu'il est possible de déterminer un taux de transfert entre deux ouvrages, soit entre Tuilières et Mauzac, à partir des comptages annuels dans les dispositifs de franchissement. Les obstacles sont distants d'une quinzaine de kilomètres seulement et il n'existe aucun affluent d'importance (Tableau 4-3).

Tableau 4-3 Taux de transfert des aloses entre les différents ouvrages de la rivière Dordogne, France.

RIVIÈRE	TRONÇON	DISTANCE ENTRE LES OUVRAGES (KM)	PÉRIODE	TAUX TRANSFERT (%)			
				MOYENNE	1 ^{ER} QUARTILE	MÉDIANE	3 ^E QUARTILE
Dordogne	Tuilières – Mauzac	15	1992 - 2015	14,0	1,6	7,8	19,0

LES SUIVIS UTILISANT LA TÉLÉMÉTRIE (RADIO OU ACOUSTIQUE)

Ces suivis consistent à équiper les poissons d'émetteurs actifs (c'est-à-dire équipés d'une batterie) et à suivre leurs déplacements par des antennes fixes ou mobiles. Les distances de réception peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres, mais les suivis sont limités dans le temps par la durée de vie de la batterie. Ils permettent d'étudier précisément le comportement des poissons au niveau des ouvrages, à proximité et dans les dispositifs de franchissement, de déterminer les durées de présence des individus à l'aval des obstacles, les durées de blocage et l'efficacité des dispositifs (sous réserve d'un nombre d'individus suivis suffisant). Toutefois, les biais liés à la capture et au marquage des poissons peuvent être importants. Par exemple, Castro-Santos et al. (2014) ont mis en évidence pour l'alose américaine que le taux de franchissement de l'usine de Gate House à Turners Falls sur la rivière Connecticut, déterminé par télémétrie, était nettement inférieur à celui observé par comparaison des passages enregistrés dans la passe de la centrale Cabot et dans celle de Gate House. Il y a toutefois d'autres études de télémétrie sur l'alose américaine qui donnent des efficacités du même ordre de grandeur que les taux de transfert (Vernon en 2011, Holtwood en 2001 et 2008). Pour l'alose européenne, les efficacités nulles observées pour les dispositifs de Tuilières (rivière Dordogne) et Golfech (rivière Garonne), qui reposent sur un nombre très limité de poissons marqués, ne reflètent pas les réalités. Ces passes ont en effet permis le passage de plusieurs dizaines de milliers d'individus certaines années. De manière générale, il conviendra d'analyser avec précaution les résultats concernant l'efficacité des ouvrages obtenus à partir de suivis par télémétrie. Cette technique permet toutefois d'identifier les problèmes rencontrés par les poissons au droit d'un ouvrage, notamment en ce qui concerne **l'attractivité lointaine, proche et la franchissabilité des dispositifs**. Différentes études ont été réalisées sur l'alose américaine sur la côte Est des États-Unis. Les principaux résultats au niveau des dispositifs de franchissement sont présentés dans le Tableau 4-4.

LES SUIVIS RÉALISÉS GRÂCE À LA TECHNIQUE RFID (RADIO-FREQUENCY IDENTIFICATION)

Contrairement à la télémétrie radio ou acoustique, les suivis RFID ont recours à des émetteurs passifs qui utilisent l'énergie des antennes pour émettre leur code. Pour cette raison, les distances de détection sont faibles (jusqu'à environ 1 m), mais permettent de suivre les poissons sur de très longues périodes (jusqu'à 15 ans). Ils ne permettent pas d'appréhender le comportement général des individus au niveau des ouvrages, ni l'efficacité globale des dispositifs de franchissement ou les durées de blocage. Ils permettent toutefois de fournir des informations complémentaires à celles obtenues par la télémétrie (radio ou acoustique) au niveau des dispositifs de franchissement eux-mêmes : nombre d'entrées dans les dispositifs, comportement à l'intérieur dans le cas où plusieurs systèmes de détection sont installés, durée de franchissement, % de poissons entrant dans les dispositifs et parvenant à passer à l'amont, etc. Les coûts de suivi moins élevés permettent généralement de marquer beaucoup plus de poissons et d'obtenir des résultats plus robustes. En outre, le marquage des poissons est plus simple et *a priori* moins traumatisant que la télémétrie radio ou acoustique. Les données disponibles pour l'alse, présentées au Tableau 4-5, concernent presque exclusivement les trois passes à poissons du site de Turners Falls sur la Connecticut (centrale Cabot, déversoir et Gate House).

Tableau 4-4 Synthèse des différentes études menées à l'aide de la technique de radiotélémetrie afin de déterminer le comportement des aloses et les impacts des ouvrages.

RIVIÈRE	SITES (ANNÉE)	RÉFÉRENCE	TYPE DE PASSE	ATTRACTIVITÉ "LOINTAINE"	ATTRACTIVITÉ "PROCHE"	ATTRACTION "TOTALE"	TAUX DE FRANCHISSEMENT DU DISPOSITIF	EFFICACITÉ
Susquehanna (États-Unis)	Conowingo (2010)	Normandeau et Gomez and Sullivan, 2011	Ascenseur	90 % (n = 80)	81 % (n = 65)	73 %	62 % (n = 40)	45 %
Susquehanna (États-Unis)	Conowingo (2012)	Normandeau et Gomez and Sullivan, 2012	Ascenseur	64 % (n = 42)	69 % (n = 29)	44 %	59 % (n=17)	26 %
Susquehanna (États-Unis)	Holtwood (2008)	Normandeau et Gomez and Sullivan, 2011	Ascenseur	--	--	75 % (n = 96)	15 % (n = 14)	11 %
Susquehanna (États-Unis)	Holtwood (2010)	Tryninewski et al., 2012	Ascenseur	--	--	63 % (n = 86)	53 % (n = 46)	34 %
Susquehanna (États-Unis)	York Haven (2010) ¹	York Haven Power Company, 2011	Passe à bassins (fentes + chicanes)	82 % (n = 28)	32 % (n = 9)	26 %	56 % (n = 5)	15 %
Connecticut (États-Unis)	Holyoke (1980)	Barry et al., 1982	Ascenseur usine ²	--	--	--	--	42 % (n = 5)
Connecticut (États-Unis)	Holyoke (1981)	Barry et al., 1982	Ascenseur	--	--	--	--	67 % (n = 4)
Connecticut (États-Unis)	Holyoke (2011)	Sprankle, 2012	Ascenseur	--	--	--	--	65 % (n = 35)
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls - Gate House (2008)	Castro-Santos et al., 2014	Passes à bassins (fentes) avec canal collecteur	--	--	51 % (n = 19)	47 % (n = 9)	24 %
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls - Gate House (2009)	Castro-Santos et al., 2014	Passes à bassins (fentes) avec canal collecteur	--	--	14 % (n = 6)	50 % (n = 3)	7 %
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls - Gate House (2009) ³	Castro-Santos et al., 2014	Passes à bassins (fentes) avec canal collecteur	--	--	36 % (n = 5)	60 % (n = 3)	21 %
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls - Gate House (2010)	Castro-Santos et al., 2014	Passes à bassins (fentes) avec canal collecteur	--	--	47 % (n = 18)	50 % (n = 9)	24 %
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls - Gate House (2010) ³	Castro-Santos et al., 2014	Passes à bassins (fentes) avec canal collecteur	--	--	98 % (n = 45)	27 % (n = 12)	26 %
Connecticut (États-Unis)	Vernon	Castro-Santos, 2011	Passe à bassins (Ice Harbor)	58 % (n = 19)	42 % (n = 8)	24 %	0 %	0 %
Merrimack (États-Unis)	Lawrence (1993)	Lawrence Hydroelectric Associates, 2013	Ascenseur	--	--	--	30 %	--

RIVIÈRE	SITES (ANNÉE)	RÉFÉRENCE	TYPE DE PASSE	ATTRACTIVITÉ "LOINTAINE"	ATTRACTIVITÉ "PROCHE"	ATTRACTION "TOTALE"	TAUX DE FRANCHISSEMENT DU DISPOSITIF	EFFICACITÉ
Merrimack (États-Unis)	Lawrence (1994 - 1995)	Lawrence Hydroelectric Associates, 2013	Ascenseur	--	--	--	72 %	--
Merrimack (États-Unis)	Lowell (Pawtucket)	Sprankle, 2005	Ascenseur	50 % (n = 18)	--	--	--	11 % (n = 4)
Merrimack (États-Unis)	Lowell (Pawtucket)	ALDEN, 2011	Ascenseur	--	--	11 % (n = 3)	67 % (n = 2)	7 %
Cooper (États-Unis)	Pinopolis Lock (2002)	Normandeau Associates, Inc., 2003	Écluse de navigation	85 % (n = 74)	66 % (n = 49)	56 %	90 % (n = 44)	51 %
Cooper (États-Unis)	Pinopolis Lock (2003)	Normandeau Associates, Inc., 2003	Écluse de navigation	86 % (n=82)	92 % (n=75)	79 %	96 % (n=72)	76 %
Cape Fear (États-Unis)	Locks and Dams 1 (1996)	Moser et al., 2000	Écluse de navigation	--	--	75 % (n = 12)	33 % (n = 4)	25 %
Cape Fear (États-Unis)	Locks and Dams 1 (1997)	Moser et al., 2000	Écluse de navigation	--	--	55 % (n = 6)	33 % (n = 2)	18 %
Cape Fear (États-Unis)	Locks and Dams 1 (1998)	Moser et al., 2000	Écluse de navigation	--	--	83 % (n = 30)	60 % (n = 18)	50 % ⁴
Cape Fear (États-Unis)	Locks and Dams 1, 2, 3 (2008)	Smith et al., 2012	Écluses de navigation	--	--	--	--	65 % (n = 13) à LD1 85 % (n = 11) à LD2 64 % (n = 7) à LD3
Dordogne (France)	Bergerac	Verdeyroux et al., 2015	Passe à bassins (fentes)	100 % (n = 4)	50 % (n = 2)	50 % (n=2)	50 % (n = 1)	25 %
Dordogne (France)	Tuilières	Verdeyroux et al., 2015	Ascenseur	88 % (n = 7)	0 %	0 %	--	0 %
Garonne (France)	Golfech	Verdeyroux et al., 2015	Ascenseur	100 % (n = 5)	80 % (n = 4)	80 % (n = 4)	0 %	0 %

1 La passe à poissons se situe dans un bras de la Susquehanna alimenté par un débit minimum de 56 m³/s.

2 Tous les poissons sont remontés dans le canal de fuite.

3 Poissons transportés depuis Holyoke et déversés dans le canal en amont de la centrale Cabot.

4 Trois poissons sont passés par une passe Denil et par le seuil. La franchissabilité de l'aménagement est au final de 61%.

Tableau 4-5 Synthèse des différentes études menées à l'aide de la technique RFID afin de déterminer le comportement des aloses au niveau des dispositifs de franchissement

RIVIÈRE	SITES (ANNÉE)	RÉFÉRENCE	TYPE DE PASSE	FRANCHISSEMENT	DURÉE MÉDIANE DANS LA PASSE (H)	DURÉE MÉDIANE PAR BASSINS (MIN)
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls La centrale Cabot (1999)	Haro et al., 1999	Passe à bassins (Ice Harbor)	18 % (n = 19)	24,6	22,4
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls La centrale Cabot (2000)	Haro et al., 2001	Passe à bassins (Ice Harbor)	17 % (n = 26)	8,3	7,5
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls La centrale Cabot (2001)	Sullivan et al., 2002	Passe à bassins (Ice Harbor)	16 % (n = 67)	5,6	5,1
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls La centrale Cabot (2011)	Castro-Santos et al., 2014	Passe à bassins (Ice Harbor)	34 % (n = 11), mais 63 % pour les reproducteurs multiples	--	--
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls La centrale Cabot (2012)	Castro-Santos et al., 2014	Passe à bassins (Ice Harbor)	18,5 % (n = 5)	--	--
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls Déversoir (1999)	Haro et al., 1999	Passe à bassins (Ice Harbor)	14 % (n = 7)	4,5	7,7
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls Déversoir (2000)	Haro et al., 2001	Passe à bassins (Ice Harbor)	8 % (n = 6)	6,4	11
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls Déversoir (2001)	Sullivan et al., 2002	Passe à bassins (Ice Harbor)	32 % (n = 24)	6,9	11,8
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls Déversoir (2012)	Castro-Santos et al., 2014	Passe à bassins (Ice Harbor)	8 % (n = 1)	--	--
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls Gate House (1999)	Haro et al., 1999	Passe à bassins (fentes)	88 % (n = 80)	< 10 min.	quelques dizaines de secondes au max.
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls Gate House (2000)	Haro et al., 2001	Passe à bassins (fentes)	81 % (n = 59)	< 2 min	quelques dizaines de secondes
Connecticut (États-Unis)	Turners Fall Gate House (2001)	Sullivan et al., 2002	Passe à bassins (fentes)	84 % (n = 180)	< 2 min.	quelques dizaines de secondes au max.
Connecticut (États-Unis)	Turners Falls Gate House (2012)	Castro-Santos et al., 2014	Passe à bassins (fentes)	87 % (n = 91)	< 2 min.	quelques dizaines de secondes au max.
Connecticut (États-Unis)	Vernon (2011)	Castro-Santos, 2011	Passe à bassins (Ice Harbor)	0 % (n = 18)	--	--
Dordogne (France)	Mauzac (2005)	Chanseau et al., 2006	Passe à bassins (fentes)	60 % (n = 3)	--	11 s. en moyenne

4.3 EFFICACITÉ DES DISPOSITIFS

4.3.1 COTE EST DES ÉTATS-UNIS

LA RIVIÈRE CONNECTICUT

Les trois sites ayant fait l'objet de suivis par télémétrie sont ceux de Holyoke (PK 139), Turners Falls (PK 198) et Vernon (PK 228). Les efficacités suivantes ont été observées (voir Tableau 4-4) :

- Holyoke : 42 % en 1980, 67 % en 1981 et 65 % en 2011;
- Turners Falls (Gate House) : de 7 % à 26 % entre 2008 et 2010;
- Vernon : aucune alose n'est parvenue à franchir l'ouvrage lors du suivi de 2011 (dysfonctionnement du dispositif cette année-là).

Les suivis par vidéo (voir Tableau 4-1) mettent quant à eux en évidence un **taux de transfert** moyen entre les ouvrages de Holyoke et Turners Falls (enchaînement de deux passes : Cabot + Gate House ou Déversoir + Gate House) de 4,7 % (min. : 0,6 %; max. : 14,1 %). Cela illustre les importantes difficultés de franchissement de l'ouvrage de Turners Falls mises en évidence depuis longtemps, en relation notamment avec la sélectivité des passes à bassins de type Ice Harbor équipant l'usine de Cabot et le déversoir (Haro et al., 1999 ; Sullivan et al., 2002).

Les taux de transfert observés entre Turners Falls (Gate House) et Vernon posent question. Ils paraissent en effet très élevés certaines années et en 1996 et 2001, les passages observés à Vernon sont même supérieurs à ceux de Gate House. Il est possible que les comptages, réalisés de façon manuelle jusqu'en 2006, puissent expliquer cela. Si l'on ne prend en compte que la période 2007 - 2011, le taux de transfert moyen est de 2,4 %. En 2011, de nombreux problèmes ont été mis en évidence : seuils endommagés dans la partie basse du dispositif, débit inapproprié au niveau de certains seuils, défaut de régulation de la chute au niveau de l'entrée piscicole. Les travaux d'amélioration ont été réalisés avant la migration 2012 et ont permis d'augmenter de façon très significative l'efficacité du dispositif (voir Figure 3-1 et Tableau 4-1). Le taux de transfert observé ces dernières années est en moyenne de 57 % (min : 38,9 % ; max : 69,4 %).

En moyenne, seulement 2 % des aloses contrôlées à Holyoke (maximum observé de 10 %) parviennent à passer en amont de Vernon, troisième ouvrage, situé 89 km en amont.

En 2015, pour la première fois, il a été observé 44 aloses à Bellow Falls, 4^e ouvrage sur l'axe, situé à 280 km de l'océan, soit une cinquantaine de kilomètres en amont de Vernon.

Il ne semble exister aucune influence du nombre d'individus comptabilisés au niveau des ouvrages aval sur les taux de transfert au niveau des ouvrages amont. De même, l'influence des débits ne paraît pas évidente même si lors des années à forte hydrologie durant le mois de mai, qui correspond à la principale période migratoire, les taux de transfert paraissent faibles. Cela pourrait s'expliquer par une plus faible attractivité des dispositifs par rapport à des débits concurrents alors plus importants (débits turbinés et déversés).

À Holyoke, les durées moyennes de blocage varient de 2 à 5 jours à l'usine et de 6 à 7 jours au barrage.

À Vernon en 2011, les temps de présence des poissons à l'aval immédiat du site peuvent atteindre 30 jours, la majorité d'entre eux séjournant toutefois moins de 20 jours.

Les résultats obtenus sur les différents sites permettent également de constater que la franchissabilité des passes de type Ice Harbor est très nettement inférieure à celle de la passe à fente de Gate House.

LA RIVIÈRE MERRIMACK

Les ouvrages de Lawrence (PK 48) et de Lowell (PK 70) sont distants de 22 km. Les suivis par télémétrie à Lowell ont permis de déterminer des **efficacités globales** de 11 % en 2002 et 7 % en 2011 (voir Tableau 4-4).

Les suivis vidéo (voir Tableau 4-1) révèlent un **taux de transfert** moyen entre les deux ouvrages de 14,7 % (min 2,7 %; max 37,9 %). Il ne semble exister aucune influence du nombre d'individus comptabilisés au niveau de l'ouvrage de Lawrence sur les franchissements à Lowell. Le faible débit d'équipement de l'usine de Lowell (215 m³/s) par rapport à l'hydrologie du cours d'eau (550 m³/s en moyenne durant le mois de mai) et la présence d'un tronçon de cours d'eau au bout duquel est installée une passe à bassins à doubles fentes verticales (sans contrôle des passages), ne permettent pas toujours d'appréhender les taux de transfert. On peut remarquer que le meilleur taux de transfert (38 %) a été observé lors de la seule année sans déversement au seuil au cours du mois de mai (1995).

À Lawrence, en 1993, il est annoncé une durée moyenne de blocage de 5 jours.

LA RIVIÈRE SUSQUEHANNA

Sur la rivière Susquehanna, les suivis par télémétrie (voir Tableau 4-4) réalisés au niveau des trois ouvrages de Conowingo (PK 16), Holtwood (PK 39) et York Haven (PK 88) ont permis de déterminer les efficacités suivantes :

- Conowingo : 45 % en 2010 et 26 % en 2012;
- Holtwood : 34 % en 2001 et 11 % en 2008;
- York Haven : 15 % en 2010.

Les suivis vidéo (voir Tableau 4-1) révèlent quant à eux des **taux de transfert** moyens de 31,1 % entre Conowingo et Holtwood (min. 0,1 %; max. : 63,4 %), 69,1 % entre Holtwood et Safe Harbor (min. 38,1 %; max. : 98,4 %) et 9,2 % entre Safe Harbor et York Haven (min. 0,0 %; max. : 22,2 %). La présence d'importantes zones de fraie en aval de York Haven explique en partie le faible taux de transfert au niveau de ce site (C. Freese, com. pers. 2015). Le taux de transfert entre Holtwood et Safe Harbor représente le maximum observé sur les trois cours d'eau étudiés.

Il ne semble exister aucune influence du nombre d'individus comptabilisés au niveau des ouvrages sur les taux de transfert au niveau des ouvrages amont.

Une analyse croisant les débits moyens en mai à Conowingo et les taux de transfert entre Conowingo et Holtwood et entre Holtwood et Safe Harbor permet de mettre en évidence que l'hydrologie du cours d'eau, qui conditionne le fonctionnement des usines, l'attractivité des passes à poissons et les déversements aux barrages, influent sur les taux de transfert, qui ont tendance à diminuer avec l'augmentation des débits (Figure 4-1).

À Conowingo, les durées de blocage sont en moyenne de 4 j 20 h et 9 j 4 h respectivement pour les années 2010 et 2012.

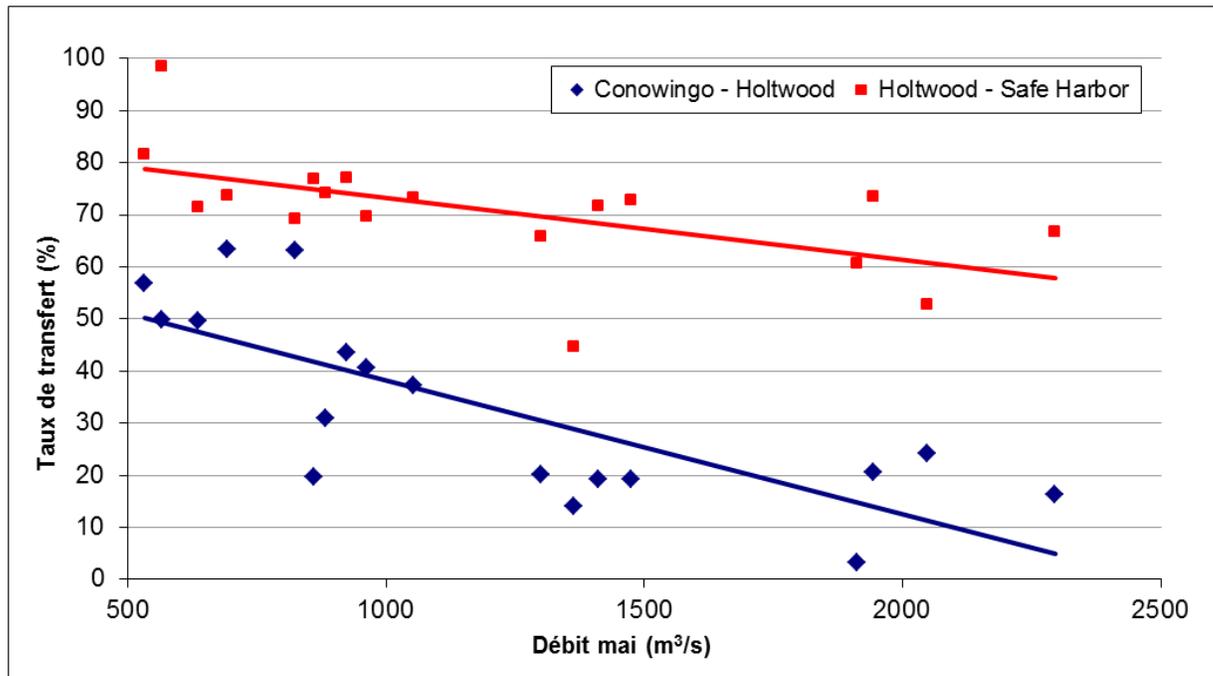


Figure 4-1 Taux de transfert entre les ouvrages de Conowingo et Holtwood et Holtwood et Safe Harbor sur la rivière Susquehanna en fonction des débits moyens en mai.

LE CAS DE SAFE HARBOR SUR LA RIVIERE SUSQUEHANNA (ÉTATS UNIS)

Il est apparu intéressant d'étudier plus en détail le cas de Safe Harbor. Il s'agit très probablement, parmi tous les sites étudiés, de celui qui impacte le moins la migration de l'alose avec un taux de transfert depuis Holtwood de près de 70 % en moyenne et peu variable selon les années (1^{er} quartile = 66,4 %; 3^e quartile = 74,0 %). Ce résultat peut paraître surprenant au regard notamment des dimensions de l'aménagement hydroélectrique (usine de plus de 300 m de largeur) et du fort débit turbiné (3 100 m³/s). Le dispositif de franchissement est constitué d'un ascenseur en rive droite de l'usine alimentée par un débit total de 17 m³/s, soit environ 0,55 % du débit maximum turbiné (3 100 m³/s) et 1,36 % environ du débit moyen en mai (1 245 m³/s; principale période de migration).

Cet ascenseur est muni de 3 entrées : la première, qui constitue l'entrée principale, située à environ 75 m à l'aval de l'usine, dans l'axe des écoulements des groupes; la seconde, maintenant condamnée, à l'aval immédiat des turbines, avec un jet perpendiculaire aux écoulements, et la troisième, au pied de l'usine, en amont de la restitution des groupes (c'est-à-dire au-dessus des aspirateurs) avec un jet perpendiculaire aux écoulements. L'ascenseur ne fonctionne qu'en journée et son cycle de remontée lors des pics de migration est de 25 - 30 min. Les deux turbines situées à proximité de l'ascenseur sont démarrées en dernier afin de ne pas perturber l'attractivité du dispositif de franchissement (R. Wagner, com. pers. 2015).

Hormis le fait que l'usine soit très équipée par rapport à l'hydrologie du cours d'eau, la rendant ainsi très attractive pour les poissons et limitant les risques d'attrait au barrage par des déversements, la principale différence avec les autres sites est la présence d'une entrée du dispositif de franchissement au pied de l'usine, au-dessus de l'aspirateur des groupes, dans une zone relativement calme d'un point de vue hydraulique, permettant au jet de se propager sur une longue distance. Aucune étude n'a toutefois été réalisée à ce jour à notre connaissance afin de vérifier que cette entrée est bien fortement utilisée par les aloses.

4.3.2 CÔTE OUEST DES ÉTATS-UNIS – RIVIÈRE COLUMBIA

Une analyse sommaire des passages comptabilisés au niveau des différents ouvrages de la rivière Columbia aval a été réalisée.

Les résultats doivent toutefois être considérés avec précaution en raison de l'impossibilité de déterminer les effectifs de poissons transitant par les écluses de navigation, qui sont toutefois *a priori* peu nombreux (Noyes, 2013) et des incertitudes concernant les comptages au regard des effectifs très importants qui empruntent les dispositifs. Ainsi, certaines années, les effectifs contrôlés dans les dispositifs de franchissement des obstacles aval sont nettement inférieurs à ceux observés au niveau des obstacles amont, ce qui se traduit par des **taux de transfert** supérieurs à 100 %.

Pour les années 1968 à 2003, pour lesquelles les données de passage sont disponibles, les **taux de transfert** moyens entre les ouvrages The Dalles (PK 308) et John Day (PK 347) et entre John Day et Mc Nary (PK 470) sont respectivement de 51,9 % et 50,0 %, ce qui se traduit par un passage à Mc Nary de 27 % en moyenne (min. : 11,4 %; max. : 57,9 % des aloses contrôlés à The Dalles).

Une analyse croisant les débits moyens en juin (principale période migratoire) et le taux de transfert entre les ouvrages de John Day et Mc Nary met en évidence une forte influence de l'hydrologie du cours d'eau (Figure 4-1) : plus les débits en juin sont importants et plus le taux de transfert est faible.

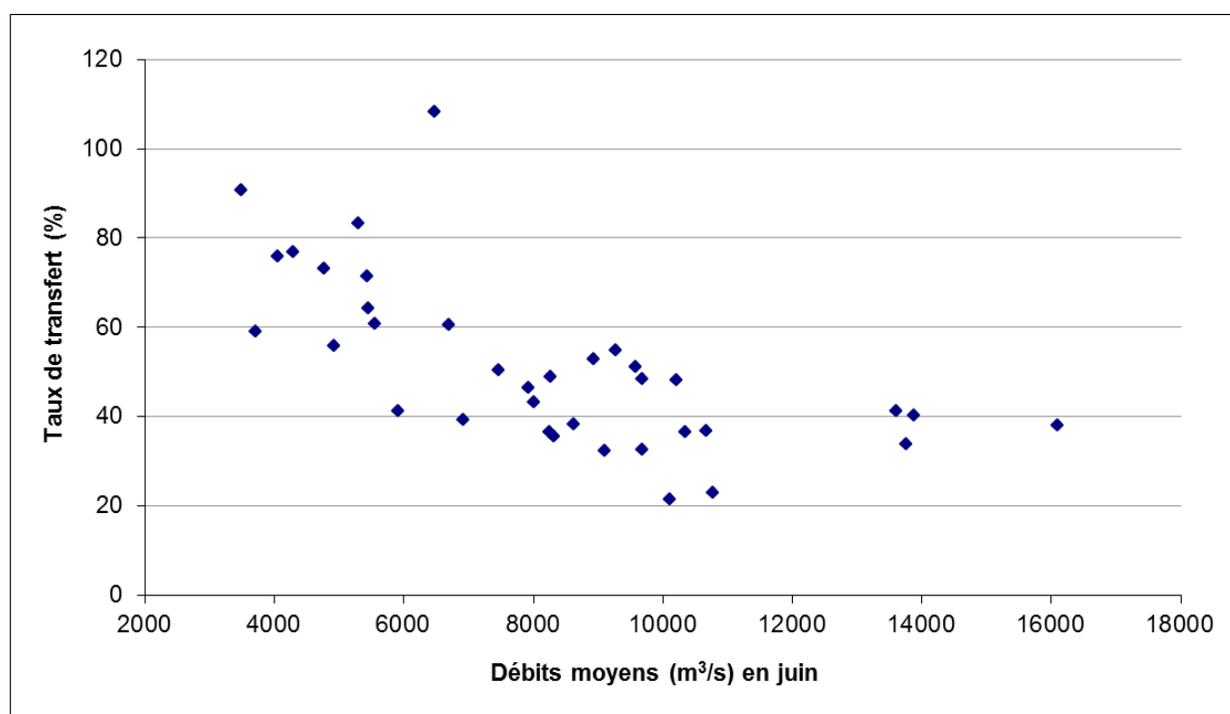


Figure 4-2 Taux de transfert entre les ouvrages de John Day et Mc Nary sur la rivière Columbia en fonction des débits moyens en juin sur la période 1968 – 2003.

4.3.3 FRANCE – RIVIÈRES GARONNE ET DORDOGNE

Les suivis par télémétrie menés sur les ouvrages de Garonne (Golfech) et Dordogne (Bergerac et Tuilières) ne permettent pas d'apprécier l'**efficacité** de ces aménagements en raison du très faible nombre d'individus qui se sont présentés à l'aval des obstacles (Verdeyroux et *al.*, 2015).

Sur la Dordogne, les comptages vidéo des passages à Tuilières et le suivi de la reproduction à l'aval des deux ouvrages, permettent d'avancer des **taux de transfert** globaux sur la période 2003-2015 compris respectivement entre 55 % et 65 % à Bergerac et entre 35 % et 55 % à Tuilières selon les hypothèses retenues pour l'évaluation des stocks reproducteurs (Courret et Chanseau, 2015).

Les suivis vidéo à Tuilières et Mauzac révèlent une évolution marquée des **taux de transfert** entre les deux aménagements au cours du temps. Ils étaient de l'ordre de 40 % en moyenne sur la période 1993-1996, lorsque la passe fonctionnait correctement et que le fonctionnement de l'usine était optimisé pour le franchissement piscicole (avec entre environ 35 704 et 87 254 aloses passant à Tuilières). Depuis le début des années 2000, ils varient selon les années entre 5 % et 15 %. Il est aussi possible, au regard du comportement de banc marqué de l'espèce, et des faibles effectifs observés à la station de Tuilières ces dernières années (de quelques dizaines à 5 635 aloses depuis 2009) que les aloses soient moins incitées à poursuivre leur migration vers l'amont, ce qui peut influencer le taux de transfert à Mauzac.

Au final, ces dernières années, quelques pourcents seulement des poissons se présentant à Bergerac passent à l'amont de Mauzac.

Sur la Garonne, la comparaison des effectifs de géniteurs se reproduisant sur la frayère située à l'aval immédiat de Golfech et de ceux franchissant l'ouvrage permet d'avancer une efficacité de l'ascenseur comprise entre 50 % et 65 % (Chanseau et al., 2000). Il est toutefois probable qu'il s'agisse d'une efficacité maximale dans le sens où les individus présents sur d'autres frayères, situées quelques kilomètres plus en aval, n'ont pas été pris en compte.

4.4 PRINCIPALES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES PAR LES ALOSES

Les suivis réalisés sur les différents sites, dont les principaux résultats sont récapitulés dans les tableaux 4-2 et 4-3, ont permis de caractériser le comportement des poissons au droit des ouvrages et d'identifier les principales difficultés auxquelles ils sont confrontés.

4.4.1 TROUVER LES ENTRÉES ET PÉNÉTRER À L'INTÉRIEUR DES DISPOSITIFS

La première difficulté à laquelle sont confrontés les poissons est de se présenter à proximité des entrées des dispositifs. Elle est directement en lien avec le nombre de voies de passage disponibles et leur position sur l'ouvrage, en relation notamment avec les conditions hydrauliques aval.

À l'exception des deux ouvrages français de Golfech et de Bergerac pour lesquels le nombre d'individus suivis est très faible, il n'existe aucun site où tous les poissons se sont présentés à proximité des entrées des dispositifs de franchissement. Les **attractivités lointaines** varient entre 50 % et 90 %. Cela est très probablement lié au fait que les capacités exploratoires des aloses sont inférieures à celles d'autres espèces comme les salmonidés par exemple.

Ainsi, par exemple, à Conowingo, il a été déterminé des attractivités lointaines respectivement de 90 % et 64 % en 2010 et 2012. Cette différence s'explique probablement par des débits en mai nettement plus élevés en 2012 ($1\,474\text{ m}^3/\text{s}$) qu'en 2010 ($924\text{ m}^3/\text{s}$).

À York Haven, l'étude menée en 2010 a révélé que 82 % des aloses se sont présentées au niveau de l'entrée de la passe. Le barrage présente une faible largeur et le débit mobilisé dans le dispositif de franchissement est élevé par rapport aux débits concurrents. En effet, l'aménagement est situé sur un bras de la rivière alimenté par un débit de $56\text{ m}^3/\text{s}$ en conditions hydrologiques normales et l'entrée de la passe est alimentée par un débit de $7,5\text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx 13\%$).

À Vernon, en 2011, seulement 58 % des poissons se sont présentés au niveau de l'entrée du dispositif. Ceci est à mettre en relation avec les débits importants durant le mois de mai cette année, mais aussi avec un problème de fonctionnement de la vanne située au niveau de l'entrée piscicole aval, qui ne permettait pas de garantir une chute attractive (J. Ragonese, comm. pers. 2015).

À Lowell, Sprankle (2005) a mis en évidence que seulement 50 % des poissons parviennent au niveau de l'entrée du dispositif.

La seconde difficulté rencontrée par les poissons est de s'engager à l'intérieur des dispositifs. Il ne suffit pas que les poissons s'approchent des entrées, il faut aussi qu'ils soient en capacité de percevoir leur existence et que les conditions soient favorables pour qu'ils pénètrent à l'intérieur

Il n'existe aucun site au niveau duquel tous les poissons qui se sont présentés à proximité des entrées des dispositifs de franchissement sont rentrés à l'intérieur. Les **attractivités proches** varient entre 31 % et 81 % (mis à part le site de Tuilières sur la Dordogne où la valeur nulle observée ne reflète pas les réalités).

À Conowingo, 69 % (2012) à 81 % (2010) des aloses qui se présentent à proximité des entrées pénètrent dans le dispositif. Ces attractivités proches font partie des meilleures observées sur les différents sites étudiés.

À Vernon, il a été observé une attractivité proche de 42 % lors de l'étude de télémétrie de 2011.

À York Haven, seuls 32 % des poissons qui se présentent au niveau de l'entrée de la passe pénètrent à l'intérieur. Il est avancé que la délivrance du débit d'attrait sans dissipation préalable à proximité du dispositif formerait une zone fortement aérée peu favorable à la prospection des aloses.

Des suivis ont également été réalisés au niveau d'écluses de navigation. À Lock and Dam 1 sur la rivière Cape Fear, de 55 % à 83 % des individus présents à l'aval de l'obstacle entrent dans l'écluse. Le dispositif fonctionne 3 fois par jour (07 h 00, 12 h 00 et 17 h 00) et mobilise un débit conséquent, compris entre 24 m³/s et 32 m³/s, par rapport au débit du cours d'eau (130 m³/s en avril et 67 m³/s en mai en moyenne au niveau de la station de Lilington). À Pinopolis, sur la rivière Cooper, 79 % des poissons présents à l'aval de l'écluse pénètrent à l'intérieur.

Au final, l'**attractivité totale**, qui regroupe les attractivités lointaine et proche, varie, selon les sites, de 15 - 20 % à 70 % environ. Indépendamment de l'aménagement et du type de dispositif de franchissement, la médiane observée est de 53 % (1^{er} quartile : 33,5 %; 3^e quartile : 73,5 %).

De tels résultats peuvent être mis en relation avec les capacités exploratoires relativement limitées des aloses (voir section 2.2), inférieures tout au moins à celles d'autres espèces comme les salmonidés par exemple, la position des voies de passage, leur attractivité et parfois leur trop faible nombre.

4.4.1.1 NOMBRE DE VOIES DE PASSAGE INSUFFISANT

L'atteinte de bonnes attractivités lointaines nécessite l'implantation de dispositifs de franchissement au bout de chacune des voies d'attrait.

Sur plusieurs sites de la côte Est des États-Unis, un dispositif a été mis en place à l'usine, et un autre au barrage, en raison de leur débit d'équipement modéré par rapport à l'hydrologie des cours d'eau et de la présence de tronçons court-circuités. À Holtwood, le débit d'équipement de l'usine correspond à environ 130 % du débit moyen du cours d'eau en mai. Aucune information ne permet toutefois de préciser les effectifs qui empruntent les deux dispositifs (R. Moyer, com. pers. 2015). À Lowell, le débit d'équipement

de l'usine représente environ 150 % des débits moyens du cours d'eau en mai. Les effectifs empruntant la passe à bassins à fentes verticales au seuil ne sont pas connus. À Holyoke, la répartition des passages d'aloses entre les deux dispositifs semble équivalente (USFWS, 2015 ; R.F. Murray Jr, com. pers. 2015), le débit dérivé par la centrale représentant en moyenne 60 % du débit du cours d'eau en mai. À Turners Falls, près de 15 % des individus empruntent le dispositif situé au barrage, sur la partie amont du tronçon court-circuité, alors que ce dernier est alimenté par un débit correspondant à environ 15 % du débit moyen du cours d'eau en mai et que le débit maximum dérivé par Gate House est proche de l'hydrologie de ce même mois. Ces exemples et résultats illustrent l'intérêt à équiper de dispositif de franchissement les différentes voies (canal de fuite et tronçon court-circuité) dès lors qu'elles sont susceptibles d'être attractives.

L'ouvrage de Safe Harbor sur la Susquehanna, en raison de son très fort débit d'équipement (environ 250 % des débits moyens annuels du cours d'eau en mai), n'est équipé que d'un seul dispositif à l'usine alors pourtant qu'il court-circuite un tronçon de rivière.

À York Haven, un seul dispositif de franchissement a été installé sur un bras de la Susquehanna alimentée par un débit minimum de 56 m³/s, soit 5 % et 7 % des débits moyens du cours d'eau respectivement en mai et juin. Selon les années, entre 27 % et 67 % (moyenne de 44 %) des poissons se présentent au seuil situé sur ce bras. Par contre, entre 62 % et 100 % (moyenne de 83 %) des aloses sont reçus au pied de l'usine dont le débit d'équipement représente 42 % et 59 % des débits moyens en mai et juin (York Haven Power Company, 2011). La mise en place d'un second dispositif au seuil principal situé dans le prolongement de l'usine est envisagée dans le cadre du renouvellement d'autorisation (C. Freese, com. pers. 2015).

Sur le site de Conowingo, les deux dispositifs mis en place au niveau de l'usine, qui présente une très grande largeur, permet d'illustrer l'intérêt de mettre en place plusieurs dispositifs. L'ascenseur situé en rive droite (ascenseur Ouest) ne sert que pour la capture des individus pour des opérations de reproduction artificielle dans le cadre du plan de restauration de l'espèce (pas de possibilité d'acheminement direct des poissons à l'amont) alors que celui situé en rive gauche (ascenseur Est) constitue le dispositif principal de montaison sur le site. Ces deux ascenseurs sont alimentés par des débits comparables. Sur la période 1991 - 2011, les aloses qui ont emprunté l'ascenseur Ouest représentent 17 % des effectifs totaux contrôlés alors que ce dispositif a fonctionné près de deux fois moins de temps que l'ascenseur Est (Susquehanna River Anadromous Fish Restoration Cooperative, 2012).

En France, pour l'alose, mais aussi pour les autres migrateurs, il est de plus en plus fréquent de mettre en place un dispositif à l'usine et un au barrage (Sordes sur le Gave d'Oloron, Puyoo sur le Gave de Pau, Golfech (projet) et Le Ramier sur la Garonne, Mauzac sur la Dordogne (projet), Langeac sur l'Allier, etc.).

L'atteinte de bonnes attractivités lointaines peut également nécessiter la mise en place de plusieurs entrées.

Plusieurs entrées reliées par une galerie horizontale à un seul dispositif ont été mises en place sur de nombreux sites sur la côte Est (Holyoke usine, Gate House à Turners Falls, Conowingo ascenseur Est, Holtwood usine, Safe Harbor, Lawrence, Lowell). La répartition des passages par les différentes entrées n'a toutefois été évaluée qu'à Gate House où deux entrées situées sur chaque berge sont reliées à la passe à bassins. Si la majorité des incursions des poissons (189 sur 244 soit 77 %) à l'intérieur du dispositif et des passages amont (76 sur 112 soit 68 %) ont lieu par l'entrée située en rive droite, récemment modifiée, 23 % des entrées et 32 % des passages sont toutefois observés par l'ancienne entrée, au niveau de laquelle les conditions hydrauliques ne sont pourtant pas optimales (Castro-Santos et al., 2014).

En France, certains ouvrages sont équipés de plusieurs dispositifs (Vichy sur l'Allier, Haitze sur la Nive, etc.) ou entrées (Mauzac sur la Dordogne, Châtellerauld sur la Vienne, Carbonne sur la Garonne, Iffezheim, Gamsheim et Strasbourg sur le Rhin, Sauveterre sur le Rhône, etc.). À Gamsheim, où deux entrées sont situées au-dessus des aspirateurs des turbines et une entrée est reportée une soixantaine de mètres à l'aval en berge, les suivis menés par RFID montrent que 93 % des salmonidés migrateurs et 76.6 % des cyprinidés (barbeau, brème et hotu) utilisent les entrées situées au-dessus des aspirateurs (Travade et *al.*, 2013 ; Tétard et *al.*, 2014).

4.4.1.2 DES ENTRÉES MAL POSITIONNÉES ET PEU ATTRACTIVES

POSITION DES ENTRÉES ET CONDITIONS HYDRAULIQUES AVAL

Les entrées doivent impérativement être positionnées dans des zones calmes, susceptibles d'être fortement fréquentées par les poissons, sur les parties les plus amont des obstacles. Les secteurs aérés et turbulents, dans lesquels les aloses stationnent peu, doivent être proscrits (MRTC, 2010 ; ALDEN, 2011 ; Normandeau et Gomez and Sullivan, 2011).

Sur de nombreux sites, il est apparu que les secteurs fortement perturbés d'un point de vue hydraulique (ascendances, etc.), en particulier en sortie des turbines des ouvrages hydroélectriques, ne permettent pas d'assurer une bonne attractivité des entrées. C'est ainsi par exemple que sur les sites de Holyoke usine, la centrale Cabot, Vernon, Lawrence et Lowell, différentes entrées (de 2 à 5) étaient à l'origine reliées aux dispositifs de franchissement via des galeries collectrices. La plupart ont été fermées depuis, car leur position, au-dessus de la sortie des turbines, ne permettait pas aux poissons de détecter leur présence.

À la centrale Cabot et à Vernon, il n'a été conservé qu'une seule entrée en berge dans laquelle a été concentré tout le débit.

À Holyoke, l'entrée située au milieu du canal de fuite a été fermée et seules deux entrées situées sur chaque berge sont maintenant alimentées.

À Lowell et Lawrence, les entrées les plus éloignées de l'ascenseur ne sont plus alimentées et une seule entrée en berge, au plus près de l'ascenseur, a été maintenue. Au-delà de la volonté de concentrer les débits dans un nombre plus réduit de voies de passage, ce choix a également été dicté par les nombreuses observations de poissons qui pénétraient dans la galerie par l'entrée la plus éloignée de l'ascenseur et qui ressortaient par l'autre entrée, au niveau de laquelle ils devaient négocier un virage à angle droit pour se présenter au niveau de la nasse de piégeage.

Dans certains cas, il a été mis en place une priorisation du fonctionnement des groupes sur de nombreuses centrales hydroélectriques lorsque les débits entrants sont inférieurs aux capacités de turbinage des usines. L'objectif est de permettre aux poissons de se rapprocher des entrées des dispositifs tout en garantissant une attractivité satisfaisante de ces dernières.

À Vernon, le groupe situé le plus près de l'entrée piscicole est démarré en premier (J. Ragonese, com. pers. 2015). À Holtwood, l'ancienne usine, située à proximité de l'ascenseur, est prioritaire jusqu'à un débit de l'ordre 255 m³/s. Le débouché du groupe 1 a été prolongé pour sortir dans le tronçon court-circuité et éviter de perturber les entrées piscicoles. Les groupes 3, 5 et 6, situés sur la même rive que l'ascenseur, mais pas à proximité immédiate, sont démarrés en premier (R. Moyer, com. pers. 2015). Le groupe 2, le plus proche de l'ascenseur, est mis en service en dernier. Ces règles ont été déterminées de manière empirique. Elles sont toujours en application même si aucune information issue des différentes études n'a permis d'en vérifier la réelle efficacité. À Safe Harbor, les deux groupes situés à proximité de l'ascenseur sont arrêtés en priorité (R. Wagner, com. pers. 2015).

Dans d'autres cas (Conowingo, Holtwood, Safe Harbor), il a été choisi de positionner plusieurs entrées à différentes distances des ouvrages afin de garantir l'existence de voies de passage attractives pour différentes conditions de fonctionnement des usines dans des zones susceptibles d'être fréquentées par les poissons. À Conowingo, les deux entrées sont alimentées en alternance selon le fonctionnement de l'usine. Les poissons évitent les zones aérées à fortes turbulences à l'aval des turbines Kaplan lorsqu'elles fonctionnent (Normandeau et Gomez and Sullivan , 2011) et l'entrée amont étant sous l'influence du fonctionnement de ces groupes, elle n'est alimentée que lorsque ces derniers sont à l'arrêt. Lorsque ces groupes sont en fonctionnement, c'est l'entrée aval, située à plus de 80 m de l'usine, qui est en fonctionnement (Figure 4-3 et Figure 4-4).

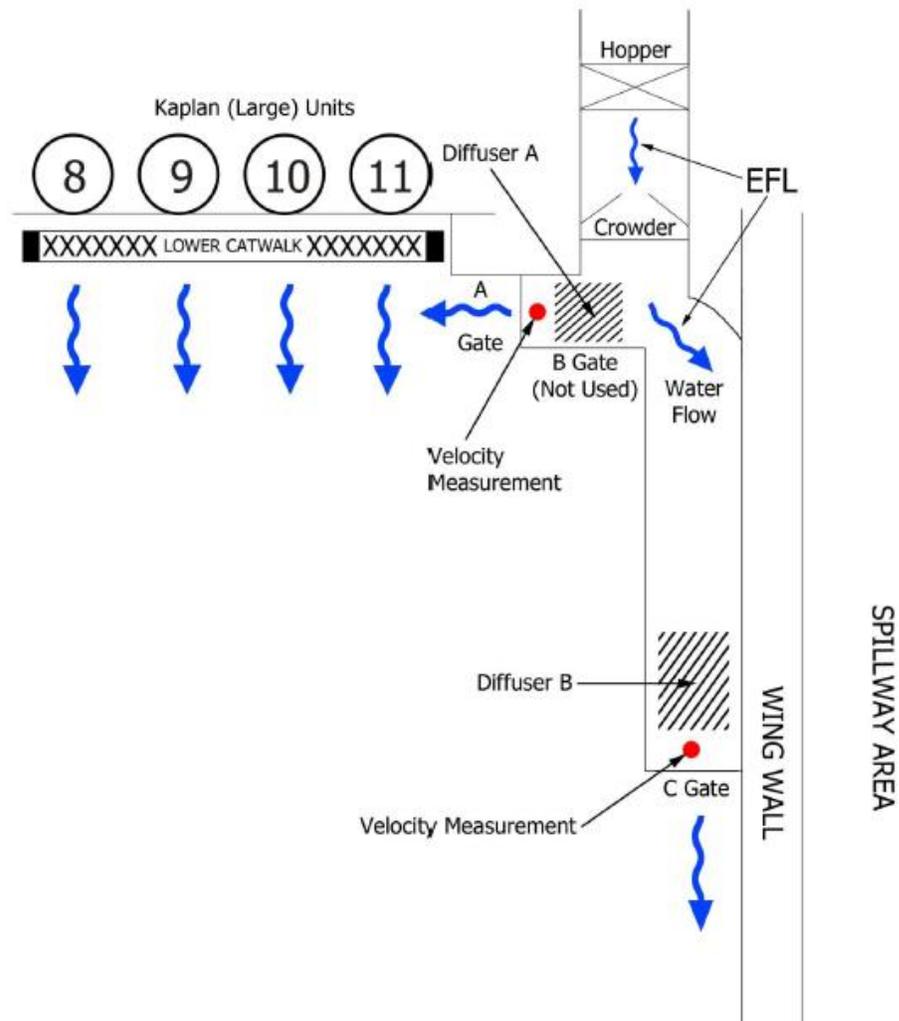


Figure 4-3 Plan sommaire des deux entrées de l'ascenseur de Conowingo sur la rivière Susquehanna (Normandeau et Gomez and Sullivan, 2012).

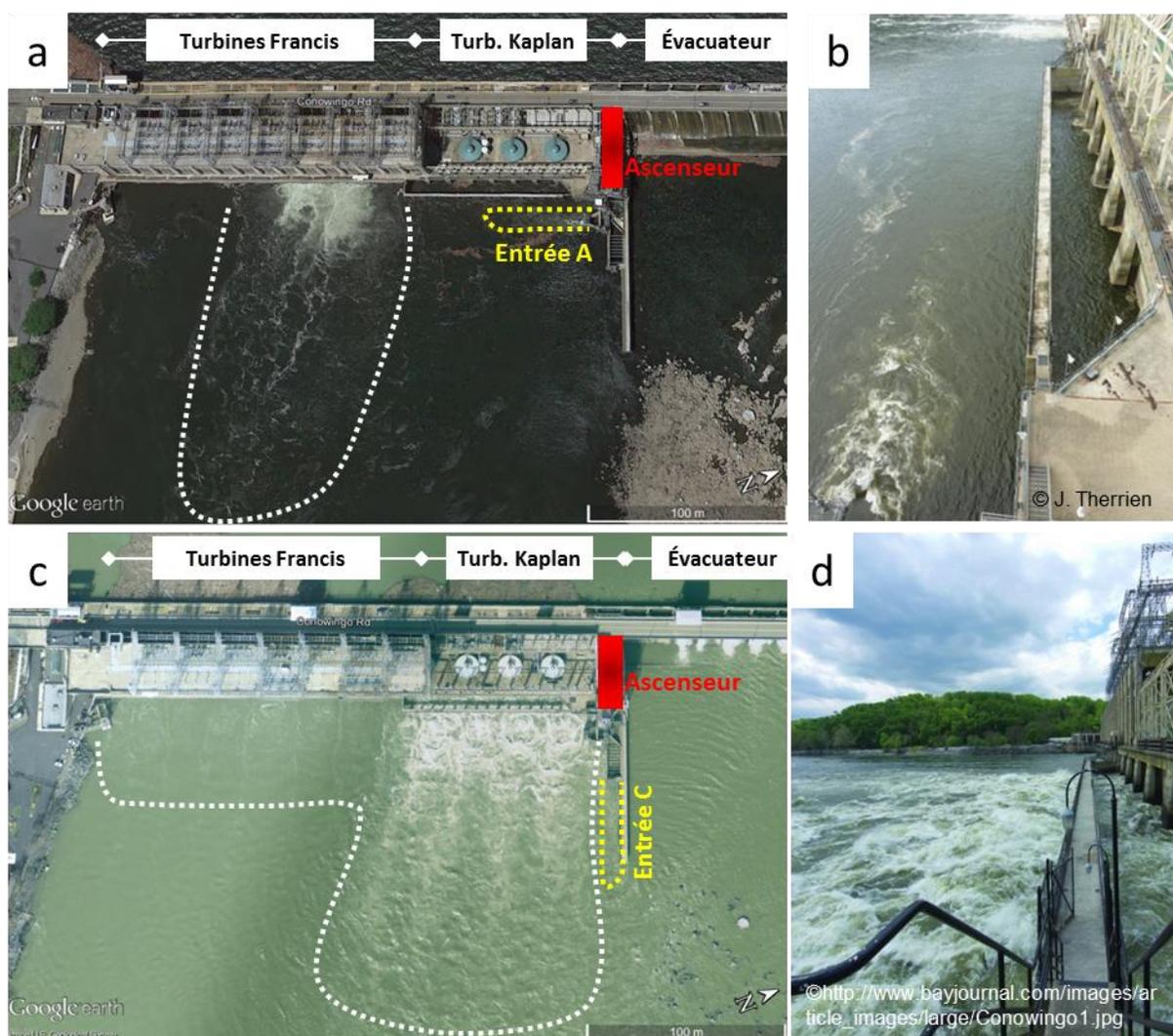


Figure 4-4 Influence du fonctionnement des groupes sur les conditions hydrauliques à l'aval de la centrale de Conowingo sur la rivière Susquehanna a) Turbines Francis en marche et alimentation de l'entrée A b) Jet en sortie de l'entrée A c) Turbines Kaplan en marche et alimentation de l'entrée C d) Conditions hydrauliques au niveau de la sortie des turbines Kaplan.

Sur d'autres sites enfin, la position des entrées a été modifiée suite aux suivis réalisés. À Gate House, l'entrée située en rive droite a été déplacée vers l'aval dans une zone moins perturbée d'un point de vue hydraulique (ascendances, vitesses, forte aération, etc.) et davantage fréquentée (Figure 4-5) par les aloses (Castro-Santos et al., 2014). D'autre part, son débit d'alimentation a été augmenté en réduisant celui de l'entrée rive gauche. Le franchissement de l'ouvrage a été nettement amélioré, même s'il demeure encore faible, comme l'ont révélé les suivis de télémétrie et l'évolution des taux de transfert Cabot – Gate House déterminés par les comptages (3,6 % en moyenne sur la période 1983-2009; 9,4 % sur la période 2010-2015).

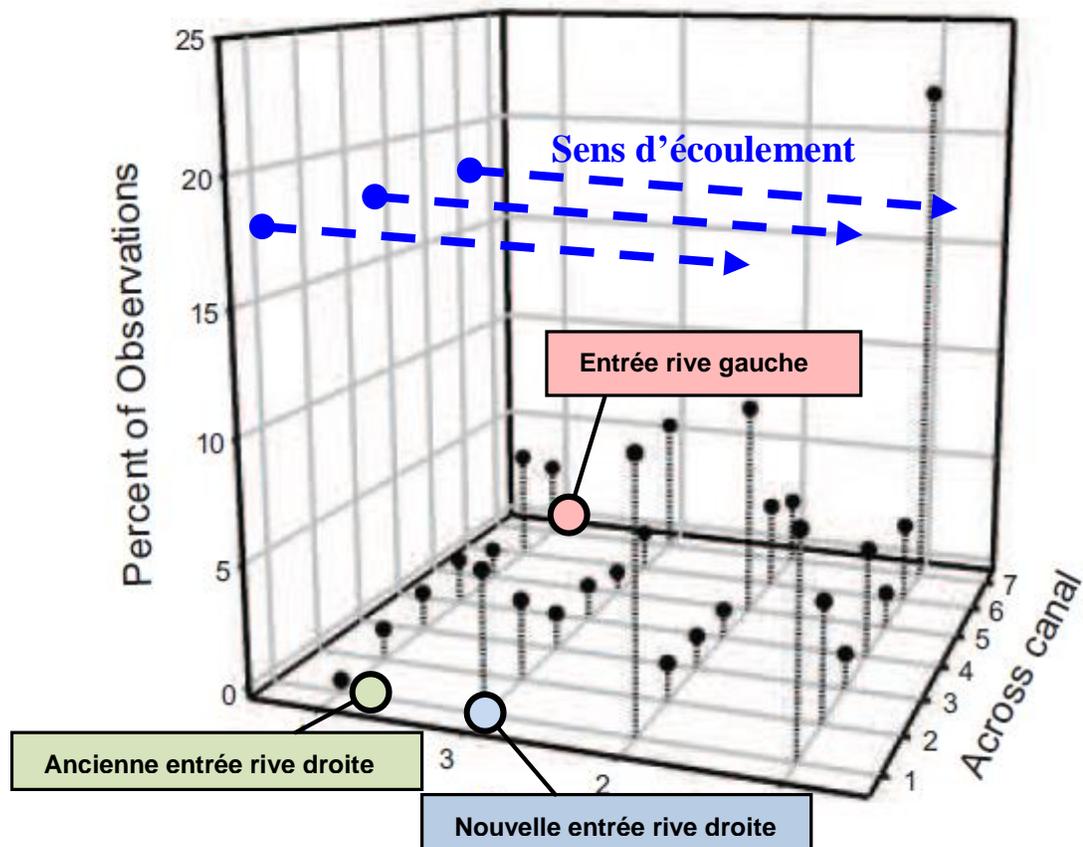


Figure 4-5 Suivi du déplacement des aloses par télémétrie en aval de l'ouvrage Gate House (site de Turners Falls, rivière Connecticut) et position des entrées de la passe (Castro-Santos et al., 2014).

À Lowell, l'entrée a été récemment déplacée à l'aval de la zone de forte turbulence par la mise en place d'un déflecteur latéral de 1,2 m de profondeur permettant de guider les écoulements.

Parfois, les entrées sont situées perpendiculairement aux écoulements principaux qui cisailent alors les jets et réduisent fortement leur attractivité. C'est le cas à Safe Harbor où l'entrée située à l'aval immédiat de la sortie des groupes a été condamnée.

Les encoignures ou les zones de recirculation constituent souvent des zones fortement fréquentées par les aloses (Larinière et al., 1994). Cela a en particulier été observé sur le site d'Holtwood, dans une zone hydrauliquement protégée située en amont de la sortie des groupes et des deux entrées de l'ascenseur (Tryniewski et al., 2012), ou plus récemment sur le site de Bergerac où de nombreux poissons stationnent dans une zone calme située entre la sortie des turbines (zone fortement agitée) et la passe à poissons (dont l'entrée est située une dizaine de mètres en aval). Deux grands types de solutions sont envisageables : la mise en place d'une entrée dans ces zones particulières ou la réduction de leur surface. C'est cette dernière option qui a été choisie à Holtwood en 2013.

Sur d'autres sites enfin comme au niveau des barrages de Holyoke et Turners Falls, la délivrance des débits réservés par surverse masque fortement les entrées des ascenseurs. Des réflexions sont en cours pour limiter les problèmes d'attractivité des entrées des dispositifs en décalant l'entrée vers l'aval (cas de Turners Falls) ou en réorientant les écoulements (cas de Holyoke).

CONDITIONS HYDRAULIQUES AU NIVEAU DES ENTRÉES

Au-delà des conditions hydrauliques à l'aval immédiat des voies de passage, qui paraissent fondamentales pour assurer une attractivité satisfaisante des entrées, plusieurs paramètres sont susceptibles d'exercer une influence sur la capacité des poissons à percevoir l'existence des voies de passage et à pénétrer à l'intérieur des dispositifs.

En ce qui concerne les **débits d'alimentation**, les critères utilisés aux États-Unis et en Europe sont assez comparables.

Sur la côte Est des États-Unis, les débits mobilisés pour assurer l'attractivité des dispositifs varient de 2,3 m³/s à 17 m³/s, avec des débits par entrée compris entre 2,3 m³/s et 10 m³/s environ. Ils représentent 0,7 % à 2,5 % (moyenne de 1,5 %) des débits moyens annuels des cours d'eau (8 % à Turners Falls au niveau duquel sont installés 3 dispositifs) et 0,5 % à 2 % (moyenne de 1,1 %) du débit moyen des cours d'eau (6,2 % à Turners Falls et 5 % dans le bras de York Haven) lors de la principale période de migration des aloses. Pour les centrales hydroélectriques, les débits mobilisés dans les dispositifs représentent 0,35 % à 2,9 % (moyenne de 1,4 %) des débits maximum turbinés et 0,6 % à 2,9 % (moyenne de 1,6 %) des débits moyens turbinés en mai. Les pourcentages les plus élevés sont observés à Holyoke et à la centrale Cabot.

En Europe, en France en particulier (voir Tableau 3-2), les passes mobilisent des débits variant généralement entre 1-1,5 m³/s et 6,5 m³/s et pouvant atteindre 15 m³/s sur les plus gros ouvrages comme sur le Rhin. Ces débits représentent globalement entre 1 % et 4 % (moyenne de l'ordre de 2 %) des débits moyens annuels des cours d'eau. Lors du mois de mai, durant lequel se concentre une importante activité de migration sur tous les sites, l'alimentation des dispositifs représente 0,8 % à 4 % (moyenne de l'ordre de 1,9 %) du débit moyen des cours d'eau. Pour les centrales hydroélectriques, les débits mobilisés dans les dispositifs représentent généralement 0,9 % à 3,5 % (moyenne de 1,7 %) des débits maximum turbinés. La passe à bassins installée au Portugal au barrage de Açude-Ponte sur la rivière Mondego est alimentée par un débit de l'ordre de 2-2,5 m³/s (Almeida, com. pers. 2015) qui correspond à près de 5 % des débits concurrents en mai en 2013 et 2014 et près de 20 % en 2015 (année à très faible hydraulicité).

Il paraît difficile d'établir en l'état une relation entre le débit d'alimentation d'un dispositif, son attractivité et plus globalement son efficacité. Les suivis sont en effet limités et de nombreux facteurs sont susceptibles d'influer sur l'attractivité des voies de passage. Sur de nombreux sites toutefois, il est souvent mis en avant des **débits insuffisants** pour assurer une attractivité adéquate des dispositifs (voir par exemple Sprankle (2005) sur le site de Lowell sur la Merrimack ou FERC (2014) sur le site de Conowingo sur la Susquehanna). Ainsi, à Conowingo, dans le cadre du renouvellement de l'autorisation, il est notamment demandé d'augmenter l'attractivité de l'ascenseur Est en mobilisant un débit de l'ordre de 25 m³/s qui correspond à celui qui était originellement prévu (FERC, 2014).

Sur plusieurs sites, il a été décidé de condamner certaines entrées qui paraissaient peu attractives pour à la fois concentrer les débits dans un nombre plus réduit de voies de passage et réduire les débits alloués aux dispositifs, non turbinés (Holyoke, la centrale Cabot et Vernon sur la Connecticut, Lawrence et Lowell sur la Merrimack). Sur le site de Gate House, le débit d'alimentation de l'entrée la plus utilisée par les poissons a été augmenté ces dernières années, mais la seconde entrée située sur la berge opposée a été conservée.

Les **chutes au niveau des entrées**, qui contrôlent les vitesses des écoulements, sont susceptibles d'influer fortement sur l'attractivité des voies de passage. Sur les sites américains pour lesquels les informations sont fiables, les chutes au niveau des entrées sont maintenues entre 0,15 m et 0,25 m. En France, les valeurs retenues sont généralement comprises entre 0,20 m et 0,25 m. Cela correspond à

des vitesses moyennes comprises entre 1,7 m/s et 2,2 m/s. À titre d'exemple, la faible proportion (42 %) des individus présents à l'aval des voies de passage et qui sont entrés dans le dispositif observés par télémétrie à Vernon en 2011, paraît liée à une gestion défectueuse de la vanne située au niveau de l'entrée piscicole, qui ne permettait pas d'assurer une chute aval attractive (J. Ragonese, comm. pers. 2015). Ces résultats sont confirmés par le faible taux de transfert observé par comptage vidéo cette année-là (0,3 %) par rapport à Turners Falls. Des modifications ont été apportées dès l'année suivante et ont permis de revenir à des taux de transfert du même ordre de grandeur que ceux observés dans les années 1990 (de 60 à 70 %).

DIMENSIONS DES ENTRÉES

Les **dimensions (largeur et profondeur) des entrées** sont susceptibles d'exercer une forte influence sur l'engagement des aloses à l'intérieur des dispositifs, en raison notamment de leur déplacement en bancs. Sur les sites américains pour lesquels l'information est disponible, les largeurs varient de 1,2 m (Lowell) à 3 m (Holtwood) et les profondeurs entre 1,2 m (Lowell) et 2,4 m (Holtwood). En l'état, il ne paraît pas possible d'établir un lien direct entre les dimensions des entrées et leur attractivité. NWFS (2000) note toutefois que les entrées privilégiées par les saumons sur la Columbia, si elles sont situées en berge, sont également celles qui disposent des dimensions les plus importantes en largeur et en profondeur. Les plus petites sont les moins utilisées et voient un nombre important de poissons ressortir.

4.4.2 PROGRESSER À L'INTÉRIEUR DES DISPOSITIFS

Le franchissement des dispositifs de montaison, c'est-à-dire la capacité des poissons, une fois entrés, à passer en amont de l'obstacle, varie le plus souvent entre 20-30 % et 70 %.

Pour les ascenseurs, il est souvent supérieur à 50 % et atteint au maximum des valeurs de l'ordre de 70 %.

Pour les passes à bassins, il varie fortement selon les types et les caractéristiques des dispositifs. Les plus faibles valeurs sont observées dans les passes de type Ice Harbor, initialement dimensionnées pour le saumon. Plus de 80 % des poissons parviennent par contre à franchir la passe à fentes verticales de Gate House.

Les mauvaises efficacités sont liées au fait que de nombreuses entrées des aloses sont suivies de ressorties des dispositifs. Un tel comportement est également observé chez d'autres espèces comme le saumon atlantique (Larinier et *al.*, 2005 ; Karlsson, 2013) ou ceux du pacifique (Reese, 2012 ; Clabough et *al.*, 2013).

À Conowingo, pour les deux années de suivi, 30 % des poissons ont pénétré à plusieurs reprises dans le dispositif avant de passer à l'amont. En moyenne, les poissons effectuent 1,7 incursion (62 incursions pour 37 poissons).

À Lowell, le suivi 2011 a mis en évidence que les 2 individus qui sont passés à l'amont de l'obstacle sont entrés 3 fois et 20 fois dans le dispositif. Un poisson a pénétré 3 fois dans la partie aval de la passe sans parvenir à franchir l'ouvrage.

À Lawrence en 1993, les poissons ont réalisé en moyenne 33 incursions dans le dispositif.

À Bergerac, l'aloise qui a franchi l'ouvrage est rentrée 2 fois dans le dispositif. À Golfech, une alose est rentrée à 10 reprises dans le dispositif sans parvenir à passer à l'amont. La présence d'un virage à 90° en amont immédiat de cette entrée, que les poissons doivent négocier pour pénétrer dans le bassin de stabulation de l'ascenseur, peut expliquer un tel comportement.

Les poissons peuvent être confrontés à quatre grands types de difficultés :

- sur les parties aval des dispositifs en relation notamment avec les réticences probablement d'ordre comportemental au niveau de la transition entre le cours d'eau et le dispositif, les difficultés à progresser dans les galeries collectrices et à négocier les zones d'injection des débits d'attrait ;
- plus en amont, en lien avec les conditions hydrauliques internes et à la longueur des passes ;
- à différents niveaux des dispositifs, en lien avec la présence de virages prononcés ;
- et des difficultés pour le cas des ascenseurs à rentrer, puis stationner dans les nasses de piégeage.

4.4.2.1 DIFFICULTÉS SUR LES PARTIES AVAL DES DISPOSITIFS

Les ressorties des aloses des dispositifs illustrent les réticences des poissons à passer d'un milieu ouvert, le cours d'eau, à un milieu fermé, confiné, parfois bruyant ou peu éclairé, et la plupart du temps très artificiel (génie civil). Ces réticences sont très probablement renforcées par les déplacements en bancs des individus.

Dans de nombreux cas, les débits mobilisés pour assurer le franchissement des aloses sont conséquents et nécessitent l'injection d'un débit complémentaire d'attrait sur la partie aval des dispositifs qui peut désorienter les poissons et perturber leur progression vers l'amont. Sur la plupart des sites visités aux États-Unis, les débits d'attrait sont injectés au travers de grilles horizontales situées sur le fond des dispositifs.

À Conowingo, les accumulations importantes de poissons en aval immédiat des grilles d'injection du débit d'attrait observées *in situ* indiquent les difficultés rencontrées par les aloses, d'autant plus qu'elles doivent négocier, au niveau du point d'injection, un virage à angle droit pour pénétrer dans la cuve de piégeage de l'ascenseur.

À York Haven, même si aucune information ne permet de le démontrer, il est probable que la partie aval de la passe où est injecté le débit d'attrait constitue un endroit problématique pour les poissons, en raison notamment de la présence de phénomènes d'ascendance marqués.

À Lawrence, des problèmes ont été constatés en aval immédiat des portes anti-retours de la cuve de piégeage de l'ascenseur. La modification du plancher d'injection du débit d'attrait afin notamment de réduire les phénomènes d'aération a permis d'améliorer significativement la situation. L'efficacité interne du dispositif (% des aloses entrant dans le dispositif et parvenant à passer à l'amont) est passée de 10 % à plus de 70 % (Lawrence Hydroelectric Associates, 2013).

Les galeries collectrices ont été condamnées sur la plupart des sites visités sur la côte Est. Si la faible attractivité des entrées, situées au-dessus de la restitution des turbines, explique en partie ce choix, les ressorties de poissons par les entrées intermédiaires sont également mises en avant. C'est en particulier le cas sur les dispositifs de Lowell et Lawrence sur la Merrimack. Des observations comparables ont été réalisées sur le saumon, en particulier sur la rivière Columbia (Reese, 2012). En France, sur le site de Golfech, aucune des quelques aloses suivies n'est parvenue à négocier le virage à angle droit au niveau de la jonction entre les deux entrées du dispositif (Verdeyroux *et al*, 2015).

4.4.2.2 DIFFICULTÉS LIÉES AUX CONDITIONS HYDRAULIQUES INTERNES DANS LES PASSES

Les conditions d'écoulement internes doivent être parfaitement adaptées aux capacités de nage et au comportement de l'espèce, d'autant plus que les longueurs à franchir sont importantes. Des conditions

peu favorables peuvent en effet se traduire par des temps de transit importants et/ou des dévalaisons de bancs entiers (« fall back activity »), susceptibles de réduire fortement l'efficacité des dispositifs.

Pour les passes à bassins de type Ice Harbor comme celles de Turner Falls, conçues à l'origine pour le saumon et caractérisées par des jets plongeants dans les bassins, les résultats ne sont généralement pas bons même dans le cas où elles ont été modifiées (obstruction d'une échancrure). Cela peut s'expliquer en particulier par la forme des jets, qui ne sont pas vraiment de surface, et le niveau d'agitation et d'aération dans les bassins (puissances dissipées dans les bassins, de l'ordre de 200 W/m³).

Ainsi, en moyenne, 20 % des poissons qui entrent dans la passe de la centrale Cabot (longueur de 263 m; 66 bassins; chutes entre bassins de 0,3 m) parvient à passer à l'amont. Pour la passe du déversoir de Turners Falls (longueur de 180 m; 35 bassins; chutes entre bassins de l'ordre de 0,3 m), 15 % des individus parviennent à la franchir. Les durées médianes de franchissement dans ces deux dispositifs varient selon les années de 5,6 h à plus de 24 h pour celui de la centrale Cabot et de 4,5 h à 6,9 h pour celui du déversoir. Les temps de stationnement moyens par bassin sont compris entre 5,7 min et 22 min. Ainsi, des poissons qui pénètrent dans le dispositif dans l'après-midi n'ont que peu de chances de parvenir à l'amont. Nombre d'entre eux dévalent en effet le dispositif en fin de journée, lorsque la lumière du jour diminue (Haro et al., 1997 ; Sullivan et al., 2002).

Une modification de 5 seuils a été réalisée sur la partie aval du dispositif de la centrale Cabot afin de se rapprocher de jets de surface. Le franchissement des aloses et les temps de séjour dans les bassins ont été comparés avec ceux observés sur un tronçon de passe de mêmes dimensions situé juste en amont, mais sur lequel les chutes n'ont pas été modifiées (Haro et al., 2001 ; Sullivan, 2004). La comparaison réalisée par Sullivan (2004) sur le franchissement en 2000 des 4 premiers seuils modifiés révèle un taux de franchissement de 91,06 % vs 79,37 % dans la section originelle. En outre, les temps de séjour sont beaucoup plus faibles (médiane de 4,85 min dans la section modifiée vs 23,43 min dans la section non modifiée).

À Vernon, le nombre plus réduit de bassins de type Ice Harbor (25 bassins sur la partie aval auxquels succèdent 24 bassins à chicanes) et les modifications réalisées avant la saison de migration 2012 ont permis d'améliorer la franchissabilité ces dernières années, à la vue des taux de transfert depuis Gate House.

S'agissant des passes à fentes testées, les faibles efficacités observées sur les sites de York Haven et de Gate House doivent être analysées avec attention.

À York Haven, comme indiqué à la section précédente, il est très probable que les difficultés rencontrées par les poissons se situent sur la partie aval du dispositif, au niveau de l'injection du débit d'attrait.

À Gate House (aménagement de Turners Falls), comme le démontrent clairement les études RFID (voir Tableau 4-5), les difficultés se situent dans la galerie collectrice (reliée aux deux entrées de Gate House et à la passe située au déversoir) qui mène les aloses à la passe à bassins à fentes. L'efficacité moyenne de cette dernière (longueur de 70 m; 8 bassins; chutes entre bassins comprises entre 0,07 m et 0,3 m), est de 85 %. Les temps de stationnement par bassins, de l'ordre de quelques dizaines de secondes tout au plus en moyenne, sont également nettement plus courts. Des résultats comparables ont été observés pour l'aloise européenne au niveau de la passe à bassins à une fente verticale de Mauzac (longueur d'environ 80 m; 22 bassins; chutes entre bassins de 0,3 m) sur la Dordogne.

4.4.2.3 DIFFICULTÉS À NÉGOCIER LES VIRAGES

Les poissons éprouvent généralement de sérieuses difficultés pour négocier des changements de direction à l'intérieur des dispositifs, comme le révèlent par exemple Haro et *al.* (2001) ou Sullivan (2004) dans la passe de la centrale Cabot au niveau de l'aménagement de Turners Falls. Sullivan (2004) indique également que les temps de stationnement dans les bassins de retournement sont nettement plus importants et que les taux de transfert sont les plus faibles observés dans le dispositif. Les difficultés sont encore plus élevées lorsque les virages sont de 180°. Ainsi, pour les années 2001 et 2002, les durées de stationnement des aloses dans les deux bassins à 180° sont en moyenne de plus de 44 minutes avec des maximums pouvant dépasser 11 heures, alors que dans les bassins situés sur des portions rectilignes, les poissons ne stationnent généralement que quelques secondes à quelques minutes tout au plus.

À Conowingo, les observations *in situ* semblent révéler que les aloses ont du mal à négocier un virage à angle droit au niveau du point d'injection du débit d'attrait pour pénétrer dans le bassin de piégeage de l'ascenseur situé à l'amont immédiat.

Des problèmes importants ont également été observés au niveau des galeries collectrices reliées à plusieurs entrées (Lawrence et Lowell sur la Merrimack, Gate House sur la Connecticut, Golfech sur la Garonne). Dans tous les cas, les poissons, qui doivent négocier un virage à 90° au niveau de la jonction avec l'entrée située sur la partie amont de la galerie, ressortent souvent du dispositif par cette entrée. Sur les sites de Lawrence et Lowell, il a été décidé de ne conserver que l'entrée amont.

4.4.2.4 DIFFICULTÉS POUR ENTRER ET STATIONNER DANS LES SYSTÈMES DE PIÉGEAGE DES ASCENSEURS

Les poissons ont des difficultés à pénétrer et à stationner suffisamment longtemps dans les systèmes de piégeage des ascenseurs.

Ainsi, à Conowingo, 63 des 65 poissons qui sont entrés dans l'ascenseur en 2010 ont été reçus à l'aval immédiat des portes anti-retours mais seulement 40 sont finalement passés à l'amont (61 %). En 2012, des données plus précises révèlent que sur les 29 poissons qui sont entrés dans le dispositif, 26 sont passés en amont des portes anti-retours (90 %), mais seulement 17 ont été capturés et transférés à l'amont, ce qui représente 59 % des poissons entrés dans le dispositif et 65 % de ceux ayant franchi le système anti-retour. Il ne semble donc pas que les poissons aient de réelles réticences à franchir le système anti-retour; par contre, un pourcentage significatif (35 %) des individus parviennent à ressortir du bassin de piégeage.

En termes de fréquence de remontées des cuves, les rythmes, qui varient généralement entre 10 min et 1 h lors de la principale période de migration, sont assez comparables entre les sites. La diminution de la fréquence de remontée de l'ascenseur de Conowingo en 2012 par rapport à 2010 (1 h en 2010 et 30 min en 2012) n'a apparemment pas permis d'en améliorer sa franchissabilité. L'hydrologie nettement moins favorable en 2012 pourrait expliquer ce résultat. Il est d'ailleurs demandé, dans le cadre du renouvellement d'autorisation de l'ouvrage, d'assurer une fréquence de remontée de 15 min (FERC, 2014).

Les configurations des portes anti-retours sont par contre sensiblement différentes, sans qu'il ne paraisse possible en l'état de déterminer celles qui sont les plus adaptées. Ainsi, les espacements entre les portes varient de l'ordre de 0,3 m à Conowingo et Holtwood à 0,6 m à Lowell et environ 1 m à Safe Harbor

À Lawrence, le système anti-retour a été modifié : le système initial en V a été transformé en une chicane par la fermeture d'une des portes. La nette amélioration constatée entre les suivis de 1993 et ceux de

1994 – 1995 pourrait s'expliquer par cette modification. Dans le même temps toutefois, l'injection du débit d'attrait a été optimisée, ce qui ne permet pas de distinguer les effets des deux modifications.

À Lowell, l'espacement initial de 1,2 m a été porté par la suite à 0,6 m, sans qu'il soit réellement possible d'en estimer l'efficacité.

Il était enfin intéressant d'évoquer les essais réalisés sur l'écluse de Locks and Dams 1 sur la rivière Cap Fear. Les meilleurs résultats obtenus en 1998 par Moser et *al.* (2000) sont à mettre en relation avec la fermeture d'une des deux portes aval, afin notamment d'augmenter l'attractivité du dispositif. Il est aussi possible que cela ait permis d'améliorer la rétention des poissons.

4.5 CONCLUSION

Il apparaît que les dispositifs de franchissement étudiés présentent une efficacité limitée pour les aloses. Comme le disaient déjà Larinier et Travade (2002), une efficacité de 75 % est exceptionnelle, 50 % est excellent et 10 % - 20 % est malheureusement courant. Sur la grande majorité des sites visités aux États-Unis en 2015, il est observé (voir Tableau 4-4) une efficacité inférieure ou égale à 50 % (médiane : 26 %; 1^{er} quartile : 13 %; 3^e quartile : 48 %). Les meilleurs résultats, de l'ordre de 70 %, l'ont été au niveau d'ouvrages (Holyoke, Safe Harbor, Vernon ces dernières années, écluses de Pinopolis Lock et Locks and Dams 1) très différents en termes de dimensions, de débits mobilisés, de type de dispositif de franchissement, etc. Plusieurs explications peuvent être avancées pour expliquer ces résultats : pour Holyoke, la présence de deux dispositifs, l'un à l'usine et l'autre au barrage, ainsi que le débit d'alimentation de l'ascenseur à la centrale, qui représente près de 3% du débit maximum turbiné; à Safe Harbor et à Vernon, l'attractivité des passes, en relation notamment avec la position de leur(s) entrée(s) et les règles de fonctionnement des turbines des centrales ; au niveau des écluses de Pinopolis et Locks and Dams 1, l'importance des débits mobilisés.

L'alose, comme les autres poissons, est confrontée à 3 principaux problèmes au niveau des obstacles : se présenter à proximité des voies de passage, trouver les entrées et pénétrer dans les dispositifs puis progresser à l'intérieur afin de passer à l'amont.

Les retours d'expérience analysés dans le cadre de ce travail amènent à penser qu'il sera souvent difficile, sur la base des critères retenus jusqu'à présent, d'obtenir des efficacités supérieures à 70 - 75 %, qui correspondent globalement à des efficacités de l'ordre de 90 % pour chacune des trois étapes.

Dans ces conditions, les impacts cumulés de différents ouvrages érigés sur un même axe migratoire vont vite devenir très importants et rendent difficile la gestion et la restauration des populations, en particulier lorsque ces ouvrages se situent sur les parties basses des bassins, en aval des meilleures zones de reproduction des géniteurs et de croissance des juvéniles.

Il faut avoir à l'esprit que les sites sur lesquels les investigations ont été menées sur l'alose et présentées dans ce document sont très majoritairement situés sur de grands cours d'eau (module d'au moins plusieurs centaines de m³/s), ce qui ne facilite pas l'obtention d'une bonne attractivité des dispositifs.

Il paraît toutefois possible encore, même sur ce type d'ouvrages, d'améliorer l'efficacité des systèmes de franchissement en étant plus ambitieux sur un certain nombre de critères de dimensionnement. Une attention toute particulière doit être portée aux éléments suivants :

- au regard du comportement migratoire des aloses et des difficultés éprouvées par les poissons pour pénétrer dans les passes, les dimensions des dispositifs et de leur(s) entrée(s) doivent être importantes afin de ne pas déstructurer les bancs ;

- les poissons doivent pouvoir se présenter rapidement et fréquemment au niveau de l'entrée et dans les dispositifs. Les fenêtres de migration sont en effet de courte durée et une fois au pied des obstacles, l'insistance des individus pour franchir les ouvrages apparaît limitée, plus limitée tout au moins que d'autres espèces comme les salmonidés. De plus, de nombreuses aloses, comme les salmonidés, ont "besoin" de se présenter plusieurs fois au niveau de l'entrée des dispositifs ou dans les dispositifs avant de franchir les ouvrages. La position des dispositifs de franchissement, leur nombre, leur attractivité (débit d'alimentation en relation avec les débits concurrents), les conditions hydrauliques au niveau des entrées (en relation notamment avec le fonctionnement des usines hydroélectriques) et les conditions hydrauliques internes sont autant de facteurs importants à prendre en considération.

Les dispositifs doivent être fonctionnels et attractifs pour des débits des cours d'eau représentant généralement jusqu'à 2 fois environ les débits moyens annuels. Dans ces conditions, les débits concurrents sont importants et obligent à alimenter les dispositifs avec des débits conséquents. La position et l'orientation des entrées sont également des éléments particulièrement importants afin de leur garantir une attractivité suffisante, en relation avec les conditions hydrauliques en aval des obstacles (zones à fortes vitesses ou très aérées, ascendances, etc.).

5 RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION DES DISPOSITIFS

Les recommandations formulées dans la suite du document sont destinées, *a minima*, à généraliser l'atteinte des meilleures efficacités obtenues jusqu'à présent (de l'ordre de 70 %), et si possible permettre d'obtenir des efficacités supérieures. Elles s'appuient en particulier sur les documents de Larinier et Travade (2002), NOAA (2012), Towler et *al.* (2013) et Orvis et *al.* (2016) mais aussi sur les enseignements qui ont été acquis à la fois grâce à la revue documentaire réalisée dans le cadre du présent travail et suite aux visites et échanges effectués au printemps 2015 sur la côte Est des États-Unis.

5.1 HYDROLOGIE ET GAMME DE FONCTIONNALITÉ DES DISPOSITIFS

La période de migration des aloses étant courte, généralement comprise entre 30 et 50 jours, il convient d'assurer une fonctionnalité des dispositifs pleinement satisfaisante durant la grande majorité du temps et donc pour la grande majorité des conditions de débit rencontrées durant cette période.

De manière générale, les connaissances accumulées aussi bien sur les différents cours d'eau étudiés aux États-Unis que sur ceux de France amènent à préconiser un dimensionnement des dispositifs jusqu'à des débits correspondant à environ 2 fois le débit moyen annuel du cours d'eau (module).

De manière plus détaillée, à partir de l'analyse de la fréquence des débits durant la période de migration, il sera recherché une fonctionnalité des dispositifs pleinement satisfaisante durant 80 % du temps entre Q_{10} et Q_{90} (valeurs de débit non dépassées 10 % et 90 % du temps respectivement) comme préconisé par DVWK (2002), voire durant 90 % entre Q_5 et le Q_{95} comme préconisé par Orvis et *al.* (2016). L'extension à 90 % se justifie pour l'aloise étant donné la courte durée de la période de migration. Cela est cohérent avec Larinier et *al.* (1994) qui indiquent qu'il est indispensable qu'un ouvrage de franchissement destiné à l'aloise soit opérationnel de façon permanente pendant toute la période de la migration.

Sur les cours d'eau colonisés par les aloses, la présence d'autres espèces migratrices (saumon, truite de mer, lamproies, anguille) ou holobiotiques entraînera le plus souvent la prise en compte d'autres périodes de migration et donc d'autres gammes de débits qu'il faudra concilier.

L'analyse de la fréquence des débits en période de migration est à mener sur un ensemble d'années englobant des situations contrastées, sur 10 à 20 ans si possible. À défaut de disposer de données hydrologiques à proximité du site, les informations seront à extrapoler à partir des données disponibles les plus pertinentes.

5.2 NOMBRE DE DISPOSITIF AU NIVEAU D'UN AMÉNAGEMENT COURT-CIRCUITANT UN TRONÇON DE COURS D'EAU

Au niveau d'un aménagement court-circuitant un tronçon de cours d'eau, il s'agit en premier lieu de définir à quel(s) endroit(s) il est nécessaire d'implanter un dispositif : tronçon court-circuité et/ou usine. Les réflexions doivent notamment s'appuyer sur :

→ la répartition des débits entre le tronçon court-circuité et la centrale ;

- l'organisation et les vitesses des écoulements au niveau des confluences des différentes voies de migration ;
- la longueur du canal de fuite et du tronçon court-circuité ;
- les observations de présence/absence d'aloses.

Parfois, les différences de températures de l'eau entre les voies de passage (en particulier canaux de fuite et tronçons court-circuités) peuvent également influencer le comportement des poissons.

Pour espérer atteindre les plus hautes efficacités pour l'alose, il convient d'implanter un dispositif de franchissement au niveau des différentes zones d'accumulation des poissons.

Il apparaît que dans certaines configurations, même des valeurs de débit limitées sont susceptibles d'attirer une proportion significative de poissons. C'est ainsi que sur la plupart des ouvrages visités aux États-Unis qui court-circuitent une portion de cours d'eau, deux dispositifs ont été mis en place, l'un à l'usine et l'autre au déversoir (voir section 4.4.1.1). **Dès lors que les tronçons court-circuités et les usines sont alimentés par des débits significatifs lors de la période de migration de l'alose, nous recommandons d'étudier la mise en place de plusieurs dispositifs, à la centrale et au barrage.** Il n'y a que dans le cas d'aménagements hydroélectriques très fortement équipés par rapport aux débits en période de migration que la mise en place d'un seul dispositif à l'usine peut suffire (exemple de Safe Harbor avec un débit d'équipement de plus 250 % du débit moyen du cours d'eau en mai).

La période de migration de l'alose étant de courte durée, une solution peut également consister à jouer sur la répartition des débits pour les concentrer autant que possible dans le ou les tronçons équipés de dispositifs. Par exemple, le débit turbiné au niveau d'une centrale non équipée de dispositif peut être limité afin de réduire son attractivité et ainsi renforcer celle du tronçon court-circuité au bout duquel se trouve le dispositif. Les pertes de production peuvent toutefois être significatives.

5.3 NOMBRE ET POSITION DES ENTRÉES À L'ÉCHELLE DE L'OBSTACLE

De manière générale, **les entrées des dispositifs doivent être situées à proximité immédiate des zones les plus amont d'accumulation des poissons**, au niveau desquelles les individus sont arrêtés par une chute d'une hauteur infranchissable ou par des courants ou des turbulences trop violents. Elles doivent être situées **préférentiellement en berges**, qui correspondent aux principales zones de stationnement des poissons (Larinier et Travade, 2002 ; ALDEN, 2011 ; Williams et *al.*, 2012 ; Castro-Santos et *al.*, 2014). Ainsi, lorsque plusieurs voies de passage doivent être aménagées, il convient dans la grande majorité des cas de veiller à ce qu'elles soient en premier lieu positionnées sur chaque berge.

Dans tous les cas, les voies de passage doivent être situées **dans des zones non ou peu perturbées d'un point de vue hydraulique**. À ce titre, la mise en place d'entrées au-dessus des aspirateurs des turbines, dans des zones calmes, s'avère particulièrement intéressante, dans la mesure où les hauteurs d'eau y sont suffisantes (ces zones n'existent pas toujours ou sont parfois peu ennoyées) (voir le cas de Safe Harbor sur la Susquehanna, ainsi que les suivis menés sur les salmonidés et les cyprinidés au niveau du dispositif de Gambshheim sur le Rhin – Travade et *al.*, 2013 ; Tétard et *al.*, 2014). À l'inverse, les entrées situées à l'aval immédiat des aspirateurs des turbines où les écoulements sont très perturbés doivent être proscrites.

Au niveau d'un obstacle (usine hydroélectrique, seuil), il convient de positionner une entrée au niveau de chaque zone d'accumulation des aloses. Leur nombre et leur position dépendent de la configuration de l'ouvrage (largeur, orientation par rapport aux écoulements), des modalités de délivrance des débits, de la topographie du cours d'eau à l'aval, etc. De plus, ces zones peuvent varier selon les conditions

hydrologiques au sein de la gamme de fonctionnalité ciblée et le fonctionnement des groupes des centrales. L'observation du comportement des aloses à l'aval doit permettre d'orienter les choix. À défaut, il est possible de procéder par analogie avec des sites existants comparables ou de s'appuyer sur des études sur modèle réduit ou par modélisation numérique. Sur les principes d'implantation en fonction de la configuration de l'obstacle, on pourra en particulier se référer à Larinier et Travade (2002).

Les suivis réalisés sur certains sites ont révélé que plusieurs entrées ou dispositifs peuvent s'avérer nécessaires pour améliorer le franchissement (voir section 4.4.1.1), en particulier lorsque les ouvrages sont larges et que leur configuration ne permet pas de concentrer les poissons dans une zone particulière (absence de guidage). Toutefois, la multiplication des voies de passage ne permet pas toujours un gain d'efficacité. Plusieurs dispositifs sur la côte Est des États-Unis ont été conçus à l'origine avec de nombreuses entrées (galeries collectrices), mais sur la plupart des sites, il n'a été conservé au final qu'une ou deux entrée(s) au niveau de laquelle (desquelles) les débits ont été concentrés. Les voies de passage qui ont été condamnées sont principalement celles situées directement au-dessus de la sortie des turbines dont l'attractivité est fortement réduite par les ascendances et les turbulences.

Nous recommandons d'étudier la mise en place de plusieurs voies de passage pour l'aloise pour les obstacles d'une largeur supérieure à une vingtaine de mètres, comme préconisé par Larinier et Travade (2002). **Lorsque l'obstacle dépasse une centaine de mètres de large, il devient nécessaire dans la grande majorité des cas de mettre en place plusieurs entrées** reliées à un ou plusieurs dispositifs, comme avancé d'une façon générale par Schmutz et *al.* (2015). À l'exception des très grands ouvrages installés sur des cours d'eau de très grandes dimensions, il apparaît que la mise en place de 1 à 4 entrée(s) de passage correctement positionnée(s) et dimensionnée(s) puisse(nt) permettre d'atteindre de bonnes efficacités. Une orientation marquée de l'obstacle par rapport aux écoulements, ou la possibilité de garantir la restitution de la majeure partie du débit dans la gamme hydrologique visée dans une zone particulière, peut permettre de limiter le nombre de dispositifs à mettre en place.

Au niveau d'une usine hydroélectrique, les débits transitant par les systèmes de dévalaison, généralement non dissipés et susceptibles d'attirer les poissons présents à l'aval, doivent être délivrés à proximité des entrées du dispositif de montaison, sans en masquer toutefois l'attractivité. À défaut, si ces débits s'avèrent attractifs, ils devront être rejetés très à l'aval ou la position des entrées devra être adaptée.

Le nombre de dispositif(s) à construire au niveau d'un obstacle va dépendre du nombre d'entrées à mettre en place, de leur éloignement et des possibilités de les raccorder entre elles. Il est évident que le positionnement d'entrées de chaque côté d'un ouvrage évacuateur de crue implique des dispositifs distincts.

Au niveau d'une centrale hydroélectrique, différentes entrées peuvent éventuellement être reliées à un même dispositif (galerie collectrice). Le choix de relier plusieurs entrées ou de mettre en place plusieurs dispositifs doit impérativement prendre en considération les importantes difficultés rencontrées par les aloses pour négocier les jonctions ou les changements de direction dans les galeries collectrices, qui peuvent entraîner la ressortie des poissons (voir par exemples Reese (2012) pour les salmonidés). **Il ne nous semble ainsi pas souhaitable de relier plus de 2 à 3 entrées à un même dispositif de franchissement.** S'il s'avère utile de disposer d'un nombre supérieur de voies de passage (ouvrage de largeur importante notamment), nous recommandons la mise en place de plusieurs dispositifs. La conception des systèmes de collection doit faire l'objet d'une attention particulière. Il conviendra en particulier de veiller à l'absence de zone de recirculation, à la présence de vitesses internes homogènes (des valeurs comprises entre 0,5 m/s et 1 m/s peuvent être avancées) et à la présence de virages peu prononcés. La mise en place de déflecteur(s) ou de mur(s) guideau afin de diriger les écoulements permet souvent d'améliorer le guidage des poissons et doit être étudiée en détails.

Lorsque les dispositifs sont en place ou que les contraintes sont fortes, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre pour améliorer l'attractivité des entrées. Sans en faire une généralité, il peut parfois s'avérer intéressant de déporter légèrement vers l'aval une entrée pour la positionner dans une zone calme (voir les modifications réalisées à Gate House sur la Connecticut ou les essais de prolongation de l'entrée vers l'aval par la mise en place d'un déflecteur à Lowell sur la Merrimack).

Il peut également être proposé une modification de la répartition des débits concurrents. Au niveau d'une centrale, une priorisation des groupes peut permettre de rapprocher les poissons des entrées sans pour autant en masquer leur attractivité. Dans la plupart des cas, il convient de limiter le fonctionnement du groupe le plus proche de l'entrée (voir section 4.4.1.2). Au niveau d'un barrage, la création d'une échancrure ou la mise en place d'une gestion adaptée des ouvrages évacuateurs (vannes, clapets) peut permettre d'améliorer la situation. Une attention toute particulière doit toutefois être portée aux modalités de délivrance de ces débits (position de l'échancrure ou des organes – ni trop près, ni trop loin - ; compacité des jets, etc.). Enfin, si la mise en place d'une entrée au niveau d'une zone d'accumulation des aloses telles que les encoignures n'est pas possible, une solution peut consister à réduire ou supprimer ces zones (voir l'exemple de Holtwood sur la Susquehanna).

5.4 DÉBIT D'ALIMENTATION DES DISPOSITIFS

Même si, en l'état, il ne paraît pas possible d'établir une relation directe entre le débit d'alimentation des dispositifs et leur efficacité, du fait de multiples autres facteurs influençant les résultats (configuration des sites, perturbations hydrauliques au niveau des entrées, etc.), il paraît évident que le débit mobilisé pour le franchissement constitue un paramètre de première importance (Katopodis *et al.*, 2011 ; Williams *et al.*, 2012). Comme l'avancent notamment Larinier et Travade (2002), Larinier (2000), Armstrong *et al.* (2010) ou NMFS (2011), plus le débit d'alimentation des dispositifs est important par rapport aux débits concurrents et plus leur attractivité est favorisée. Cela est en particulier illustré, à l'échelle des sites, par les observations récurrentes réalisées aux États-Unis (Columbia, Susquehanna, etc.) sur l'influence de l'hydrologie des cours d'eau sur les taux de transfert entre ouvrages : plus les débits des cours d'eau sont élevés lors de la période de migration des aloses, plus la proportion des débits d'alimentation des dispositifs est faible, indépendamment même des déversements dans les tronçons court-circuités, et plus les taux de transfert deviennent faibles.

Dans la plupart des cas, essentiellement pour des raisons financières liées à la taille des ouvrages à mettre en place et/ou aux pertes de production d'énergie, mais aussi parfois du fait de l'existence de contraintes constructives, les débits disponibles pour alimenter les dispositifs de franchissement sont limités. Deux configurations peuvent être distinguées :

- les aménagements sans usage majeur du débit du cours d'eau, pour lesquels il n'y a pas de problèmes de disponibilité de débit pour alimenter le dispositif et où seules les contraintes de coût et de construction interviennent ;
- les aménagements avec un usage majeur du débit du cours d'eau, essentiellement les aménagements hydroélectriques, pour lesquels l'alimentation du dispositif réduit la production d'énergie.

Différentes approches ont été proposées pour déterminer le débit nécessaire à l'alimentation des dispositifs. Elles sont basées soit sur l'hydrologie des cours d'eau, soit sur les débits concurrents.

Pour celles qui s'appuient sur l'hydrologie, aux États-Unis, NMFS (2011) préconise, pour les très grandes rivières comme la Columbia et la Snake, des débits minimums à mobiliser dans les dispositifs correspondant à 3 % du débit moyen annuel. Pour des cours d'eau de dimensions plus réduites, mais dont les modules dépassent 30 m³/s environ, des valeurs comprises entre 5 % et 10 % des débits de

hautes eaux (Q_{90} - Q_{95}) sont recommandées. Pour les cours d'eau de taille encore plus modeste, des valeurs supérieures peuvent être envisagées. Ces recommandations concernent le saumon, dont les capacités de franchissement sont supérieures à celles des aloses.

En Grande-Bretagne et au Pays de Galles, Armstrong et *al.* (2010) recommandent un débit minimum correspondant à 5 % du débit moyen annuel et si possible supérieur ou égal à 10 %. En France, Larinier et *al.* (1994) indiquent que sur des cours d'eau de l'importance de la Garonne ou de la Dordogne (débits moyens annuels de l'ordre de plusieurs centaines de m^3/s), des débits d'attraction d'une dizaine de pour cent du débit du cours d'eau en étiage et de 1 % à 1,5 % pour le débit maximum de fonctionnement de l'ouvrage de franchissement (soit de l'ordre de deux fois le module interannuel) peuvent donner satisfaction.

Pour les approches qui s'appuient sur les débits concurrents, et pour les centrales hydroélectriques en particulier, Larinier et *al.* (1994), Towler et *al.* (2013) et Orvis et *al.* (2016) retiennent des valeurs comprises respectivement entre 1 % à 5 % et entre 3 % à 5 % des débits maximum turbinés. Armstrong et *al.* (2010) recommandent des valeurs comprises entre 5 % et 10 %, les plus forts pourcentages étant à appliquer sur les plus petits ouvrages ou dans le cas où les dispositifs sont mal positionnés.

Au final, étant donné les progrès à accomplir en termes d'efficacité des dispositifs pour l'alose, nous préconisons de mobiliser des débits (y compris le débit d'attrait) pour leur alimentation correspondant à minima à **3 % à 5 % des débits concurrents**.

Comme il apparaît nécessaire d'assurer, dans la grande majorité des cas, un fonctionnement des dispositifs jusqu'à environ 2 fois le module, **la somme des débits dédiés à l'ensemble des ouvrages de franchissement doit ainsi correspondre à 6 % à 10 % du débit moyen annuel des cours d'eau**. Par exemple, pour des modules de 30, 50, 100 et 200 m^3/s , nous recommandons des débits d'alimentation des dispositifs de franchissement respectivement de 2-3 m^3/s , 3-5 m^3/s , 6-10 m^3/s et 12-20 m^3/s . Pour des cours d'eau de petites dimensions ou inversement pour des cours d'eau de très grandes dimensions, ces valeurs pourront être augmentées ou diminuées.

Pour les dispositifs de franchissement situés au niveau des centrales hydroélectriques, le débit concurrent à considérer est le débit maximum turbiné lors de la période de migration des aloses.

Pour ceux situés à l'extrémité d'un tronçon court-circuité ou au niveau d'un barrage au même niveau qu'une usine, il convient de dimensionner le dispositif en relation avec le débit concurrent pour le débit maximum de fonctionnalité visé (environ 2 fois le module ou Q_{95} de la période de migration). Dans tous les cas (voir section 5.6), le débit minimal devra être de l'ordre de 1,5 m^3/s .

Au-delà d'un pourcentage de débit par rapport à l'hydrologie des cours d'eau ou les débits concurrents, il convient d'avoir à l'esprit que la valeur *per se* du débit transitant par les entrées, directement liées à leurs dimensions, revêt également une importance majeure. Les différentes recommandations sur les dimensions et la vitesse d'écoulement au niveau des entrées peuvent amener à des valeurs de débit supérieures sur les petits cours d'eau (voir section 5.6).

Au niveau des centrales hydroélectriques, pour limiter les pertes de production, une partie des débits d'attrait des dispositifs peut être turbinée ou pompée depuis l'aval. Leur injection, le plus souvent sur la partie aval des ouvrages, doit être particulièrement étudiée (voir section 5.5). Il peut également être envisagé, en dehors de la période de migration de l'alose et des autres espèces à enjeux, une réduction des débits mobilisés pour le franchissement piscicole.

5.5 INJECTION DES DÉBITS D'ATTRAIT

Généralement, les débits qu'il convient de mobiliser pour le franchissement piscicole ne transitent pas en intégralité dans les dispositifs *stricto sensu* afin de limiter les coûts de construction des ouvrages. Dans de très nombreux cas, des débits complémentaires sont ainsi délivrés à l'aval. Il est recommandé que ces débits soient injectés dans la partie terminale des dispositifs et non pas à proximité immédiate afin qu'ils transitent par leurs entrées.

Les modalités d'injection revêtent une importance particulière pour ne pas perturber la progression des poissons à l'intérieur des ouvrages. Pour des informations détaillées, on pourra en particulier se référer à Larinier et *al.* (1994), Larinier et Travade (2002), NMFS (2011) et Orvis et *al.* (2016). On rappelle ici brièvement que :

- le débit d'attrait doit être injecté à travers une grille pour éviter que les poissons ne soient piégés dans le bassin de dissipation. L'injection peut se faire par l'intermédiaire d'un diffuseur de fond ou d'un diffuseur latéral. En France et en Europe, il est privilégié une injection latérale pour faciliter l'entretien des grilles ;
- l'énergie du débit d'attrait doit être particulièrement bien dissipée en amont de son injection à travers la grille afin de ne pas créer des perturbations hydrauliques (vitesses hétérogènes, ascendances, etc.) et limiter les phénomènes d'aération ;
- l'implantation des grilles d'injection doit guider les poissons vers l'amont du dispositif ;
- la vitesse de l'eau à travers des grilles d'injection doit rester suffisamment faible (< 0,3 à 0,4 m/s) par rapport aux vitesses dans la passe de façon à ne pas perturber le comportement des poissons ;
- l'espacement libre entre les barreaux de la grille est fonction de la taille des poissons susceptibles d'emprunter le dispositif : 3 cm pour les grands salmonidés et les aloses, moins pour les poissons de plus petite taille. Une attention particulière doit être portée aux problèmes d'entretien, qui peuvent être importants.

Les suivis menés récemment sur les salmonidés et les cyprinidés au niveau du dispositif de Gamsheim sur le Rhin a mis en évidence que l'injection du débit d'attrait, malgré le respect des recommandations listées ci-dessus, constitue un point de difficulté pour la progression des poissons en particulier lorsque les grilles d'injection sont colmatées et ne permettent plus de respecter les critères sur les vitesses (Travade et *al.*, 2013 ; Tétard et *al.*, 2014). Ces résultats conduisent à préconiser la mise en place d'une injection du débit d'attrait répartie en plusieurs points du dispositif pour favoriser l'attractivité du débit venant de l'amont par rapport au débit injecté. Par exemple, au lieu d'injecter tout le débit dans le dernier bassin, il peut s'agir d'injecter 1/3 du débit dans l'avant-dernier bassin et les 2/3 dans le dernier bassin. Un tel système d'injection a été conçu dans le projet de dispositif au niveau de Gerstheim sur le Rhin. La répartition de l'injection du débit d'attrait en plusieurs points fait ainsi partie des points d'améliorations intéressants pour limiter les ressorties des aloses, en particulier dans le cas d'injection de débits conséquents (> 5 m³/s).

Il faut garder à l'esprit que si ce système d'injection de débit complémentaire d'attrait réduit le génie civil de la passe, il entraîne en contrepartie des sujétions souvent lourdes d'entretien dans la mesure où il est impératif de maintenir propres les grilles d'injection.

5.6 CONDITIONS HYDRAULIQUES ET DIMENSIONS DES ENTRÉES

Dans la majorité des cas, les écoulements issus des entrées doivent être orientés vers l'aval, dans le sens des écoulements principaux, afin de limiter les phénomènes de cisaillement des jets par les débits concurrents (turbines en particulier), qui peuvent très fortement réduire leur attractivité. Il s'agit d'un point de vigilance particulièrement important, car les débits mobilisés dans les dispositifs ne pourront généralement pas contrebalancer ces phénomènes. Dans des zones calmes d'un point de vue hydraulique, une orientation très inclinée, voire perpendiculaire aux écoulements, peut toutefois être envisagée (zone en retrait, zone située au-dessus des aspirateurs des turbines, etc.).

Au niveau des entrées, il convient de garantir la présence de jets de surface et de vitesses suffisamment attractives permettant aux poissons de percevoir les voies de passage. Nous recommandons des vitesses de l'ordre de 2 m/s quel que soit le type de dispositif. Au niveau des entrées de passes à bassins ou d'ascenseurs, cela correspond à des hauteurs de chute de l'ordre de 0,20 - 0,25 m.

La principale difficulté réside dans le fait de maintenir la vitesse recommandée au niveau des entrées sur l'ensemble de la gamme de fonctionnalité du dispositif, compte tenu des variations de niveau d'eau aval dont l'élévation pour les forts débits peut augmenter les sections d'écoulements au niveau des entrées et ainsi y réduire les vitesses.

Le maintien de la vitesse recommandée peut d'une part être obtenu par :

- l'augmentation du débit transitant par les entrées concomitamment à l'élévation du niveau d'eau aval. Cela se produit lorsque le niveau d'eau amont n'est pas régulé et s'élève en même temps que le niveau d'eau aval (mis à part les ouvrages soumis à la marée). L'augmentation du débit est d'autant plus importante que les dispositifs présentent des sections hydrauliques larges, comme les rampes en enrochements. Selon les dispositifs et les évolutions des niveaux d'eau amont et aval, cela peut aider, voire suffire au maintien de la vitesse recommandée au niveau des entrées. En revanche, le débit des dispositifs n'augmente pas lorsque le niveau d'eau amont est régulé, en particulier par les centrales hydroélectriques. Dans ce cas, l'augmentation du débit peut être obtenue par la mise en place de systèmes de réglages asservis ;
- la mise en place d'une vanne levante au niveau des entrées permettant d'en contrôler la section d'écoulement. Cette solution s'adresse principalement aux entrées des passes à bassins ou ascenseurs. Le système de vanne est alors généralement asservi de manière à maintenir la chute ciblée (0,20 - 0,25 m). Cela nécessite l'installation de deux sondes de niveaux, installées l'une à l'amont de la vanne dans la passe et l'autre dans le bief aval à proximité de l'entrée.

Le maintien de la vitesse en entrée est d'autant plus important que la proportion de débit transitant par le dispositif par rapport au débit du cours d'eau est faible et tend à se réduire vers les forts débits. À l'inverse, dans les cas où la proportion de débit transitant par le dispositif demeure élevée, le maintien de la vitesse en entrée paraît moins impératif.

Il est hautement probable que les dimensions des entrées revêtent pour les aloses une importance toute particulière au regard notamment de leur déplacement par bancs et des difficultés qu'elles éprouvent pour rentrer à l'intérieur des dispositifs. Même si, en l'état des connaissances, il paraît difficile de définir des critères très précis, différentes recommandations sont formulées dans la littérature. Les cas des entrées des passes à bassins et ascenseurs, généralement étroites et implantées au droit d'obstacles présentant d'importantes profondeurs à l'aval, et celui des entrées des rampes ou rivières de contournement, généralement larges et implantées au droit d'obstacles avec de faibles profondeurs à l'aval, sont à différencier.

Pour les entrées de passes à bassins et ascenseurs, Quinn (1994) préconise pour l'alose des largeurs et des profondeurs minimales respectivement de 1,2 et 1,8 m. Ces recommandations ont été reprises par NMFS (2011) pour les grands salmonidés. Orvis et *al.* (2016) avancent, indépendamment de l'espèce, des largeurs et profondeurs minimales respectivement de 1,2 et 0,6 m. Ces paramètres dépendent toutefois des débits mobilisables dans les dispositifs et des caractéristiques de l'ouvrage, en particulier de la profondeur du cours d'eau à l'aval.

Au-delà de ces éléments issus de la littérature, certains résultats d'études vont dans le sens de l'accroissement de la largeur et de la profondeur des entrées : les profondeurs d'évolution de la majorité des aloses suivies au niveau de l'ouvrage de Lowell, qui étaient supérieures à 1,5 m (ALDEN, 2011), l'évolution en profondeur dans le canal de fuite de Golfech (Belaud et *al.*, 1985), et les taux d'entrées des aloses suivies au niveau des écluses (Normandeau Associates, Inc., 2003), dispositifs larges et ouverts, qui se sont avérés élevés. Pour le saumon, sur la Columbia, Reese (2012) note que les poissons pénètrent préférentiellement dans les dispositifs de franchissement par les entrées présentant les dimensions les plus importantes (et les plus alimentées) et suggère que les poissons hésitent davantage au niveau de celles présentant des dimensions réduites.

Par précaution, nous recommandons des largeurs et profondeurs minimales des entrées respectivement de 2 m et 1,5 m. Dans ces conditions, et en prenant en compte les autres critères retenus précédemment, il est possible d'avancer un débit minimum d'alimentation de l'ordre de 6 m³/s par entrée.

Sur les cours d'eau de dimensions modestes pour lesquels les débits alloués aux dispositifs ne peuvent atteindre cette valeur, ces dimensions peuvent être réduites en veillant à garder un rapport largeur / profondeur de l'entrée proche de 1, de façon à obtenir un jet de dimensions « carrées » susceptible de se propager le plus loin à l'aval. Pour conserver un jet nettement de surface, compte tenu des valeurs de chute ciblée (0,20-0,25 m), la profondeur de l'entrée ne doit pas être inférieure à 0,7-0,8 m. Une valeur de l'ordre de 1 m semble également constituer un minimum pour la largeur. Dans ces conditions, le débit minimum à mobiliser au niveau d'une entrée est de l'ordre de 1,5 m³/s.

Une transition progressive depuis le fond vers l'entrée du dispositif est susceptible d'améliorer le guidage des poissons et doit être étudiée (une pente maximale de 50 % est avancée par DVWK (2002). Sa mise en place est toutefois souvent très difficile sur les cours d'eau de grandes dimensions, en particulier au niveau des centrales hydroélectriques.

Les **rampes en enrochements jointifs ou à macrorugosités** sont généralement larges et implantées au droit d'obstacles avec de faibles profondeurs à l'aval. Dans la plupart des cas, il n'y a donc pas lieu de donner à leur entrée une section différente de celle du reste du dispositif. Pour les rivières de contournement, il est toutefois possible de pincer les écoulements au niveau de l'entrée. La mise en place conseillée d'une transition progressive depuis le fond vers l'entrée est souvent facilement réalisable sur ce type de passe.

5.7 CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES DISPOSITIFS DE FRANCHISSEMENT ADAPTÉS À L'ALOSE

Il convient tout d'abord de préciser que certains types de dispositifs ne sont pas bien adaptés à l'alose.

C'est en particulier le cas des passes à ralentisseurs, quel que soit les types de ralentisseurs. Même si pour des pentes modérées, elles peuvent permettre le passage d'un certain nombre d'aloses, elles ne semblent pas présenter des gages d'efficacité suffisamment élevés en raison notamment de la présence de courants hélicoïdaux et d'eaux fortement aérées (Quinn, 1994 ; Larinier et Travade, 2002 ; Orvis et *al.*, 2016).

S'agissant des écluses de type Borland, les données sur l'alose sont parcellaires. Toutefois, de nombreux dispositifs ont montré globalement une faible efficacité, aussi bien aux États-Unis qu'en Europe. Les premières écluses construites sur la rivière Columbia ont même été remplacées par des passes à bassins (Larinier et Travade, 2002). Ce type de dispositif ne peut être recommandé pour les aloses, qui présentent des exigences élevées.

Il sera récapitulé dans la suite les principales préconisations de conception et les critères de dimensionnement des types de dispositifs adaptés au franchissement de l'alose. Des éléments sur le choix du type de dispositif en fonction des caractéristiques des sites sont finalement donnés.

5.7.1 PASSES À BASSINS

Le principe des passes à bassins est de diviser la chute totale en de multiples chutes franchissables, séparées par des bassins au sein desquels les poissons peuvent se reposer (Figure 5-1). Les recommandations formulées ci-après sont issues pour l'essentiel des documents de Larinier et Travade (2002) et Orvis et al. (2016) et des différents retours d'expériences disponibles (voir section 4.4.2.2).

L'alose ne pouvant passer d'un bassin à l'autre qu'en nageant, les communications entre bassins doivent être suffisamment profondes afin d'obtenir un jet de surface. Parmi les différents modes de communication, les orifices noyés sont à proscrire, l'alose tendant à rester piégée dans les contrecourants situés en surface au-dessus des orifices (Monk et al., 1989). Les échancrures latérales profondes alternées peuvent permettre le franchissement, mais dès que le débit dans le dispositif le permet, les fentes verticales ($> 0,75 \text{ m}^3/\text{s}$), voire les doubles fentes verticales ($> 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$), doivent être privilégiées.

La prise en compte du franchissement de petites espèces, dont certaines benthiques, amène à mettre en place des fentes profondes allant jusqu'au fond des bassins (sans seuil), ainsi que de la rugosité au fond des bassins.

Les principaux critères de dimensionnement des passes à bassins portent sur :

- la hauteur de chute entre bassins. Pour l'alose seule, la chute préconisée est 0,25 m, avec une valeur maximale de 0,30 m, soit des vitesses maximales dans les jets de l'ordre de 2,2 et 2,4 m/s. Toutefois, la prise en compte du franchissement de plus petites espèces amène souvent à adopter des chutes de l'ordre de 0,20 m ;
- le type de jet qui doit impérativement être de surface. Cela signifie que la charge amont doit être supérieure à 2 fois la hauteur de chute. Sur ce point, les passes de type Ice Harbor, même modifiées, ne s'avèrent pas satisfaisantes ;
- la largeur (b) des communications (fentes ou échancrures) qui doit être au minimum de 0,40 m, et porter à 0,45-0,50 m dès que le débit dans le dispositif le permet ;
- les dimensions des bassins. Une longueur minimale de 3,5 m et une largeur minimale de 2,5 m sont préconisées vis-à-vis du comportement de banc des aloses. Des critères sont également donnés afin d'obtenir une organisation adéquate des écoulements dans les bassins. Pour les passes à fentes verticales, la longueur des bassins est généralement de l'ordre de 7 à 12 fois b. Pour une longueur de bassin de 10 b et une pente de la passe de 5 %-7.5 %, on pourra adopter une largeur égale à 7-7.5 b de façon à obtenir une topologie d'écoulement à 2 zones de recirculation et éviter l'impact du jet contre la paroi opposée à la fente. Pour des longueurs de bassins différentes, on peut préconiser de conserver un même rapport de forme largeur / longueur (0,7-0,75). Dans le cas de passes à double fente, la largeur des bassins atteint généralement 9 à 10 fois b ;

- la hauteur d'eau moyenne dans les bassins avec une valeur minimale de l'ordre de 1,0 m, porté à 1,2 m dès que le débit dans le dispositif le permet ;
- la puissance dissipée maximale dans les bassins qui ne doit pas dépasser 150 W/m³.

Dans ces conditions, pour une passe à simple fente, les débits minimums d'alimentation des dispositifs doivent être de l'ordre de 0,75 à 1 m³/s et les volumes minimums des bassins de 10 à 12 m³. Pour une passe à double fente, ces valeurs atteignent 1,5-2 m³/s et 20-24 m³. Au-delà, Orvis et *al.* (2016) recommande des volumes de bassin correspondant à 5 L par kg de poisson, soit pour l'aloise européenne, de l'ordre de 10-15 L par poisson. Dans ces conditions, et sur la base des rythmes de migration observés par Chanseau et *al.* (2000) – en moyenne, les pics de passages journaliers et horaires correspondent respectivement en moyenne à 10 % des passages annuels et 12% des passages journaliers – des volumes de bassins de l'ordre de 12 m³ semblent adaptés à un franchissement annuel d'environ 100 000 poissons.

Les passes à bassins présentent l'avantage de pouvoir être coudées ou repliées, ce qui peut grandement faciliter leur implantation. Toutefois, étant donné les difficultés des aloses à négocier les bassins de retournement, il est préconisé d'éviter ou du moins de limiter autant que possible le nombre de virages de la passe. La conception des bassins de retournement sera particulièrement soignée en conservant bien une longueur de bassins vis-à-vis de la cloison amont et en arrondissant ou coupant les angles. Le franchissement de ces bassins par les aloses peut éventuellement être amélioré en interdisant aux poissons l'accès à des zones où ils restent piégés (Dartiguelongue et *al.*, 1992 ; Larinier et *al.*, 1994).

Les passes à fentes verticales présentent l'avantage de bien s'adapter aux variations du niveau d'eau amont. Le débit transité et le volume des bassins évoluant de manière comparable, les puissances dissipées dans les bassins restent à peu près constantes.

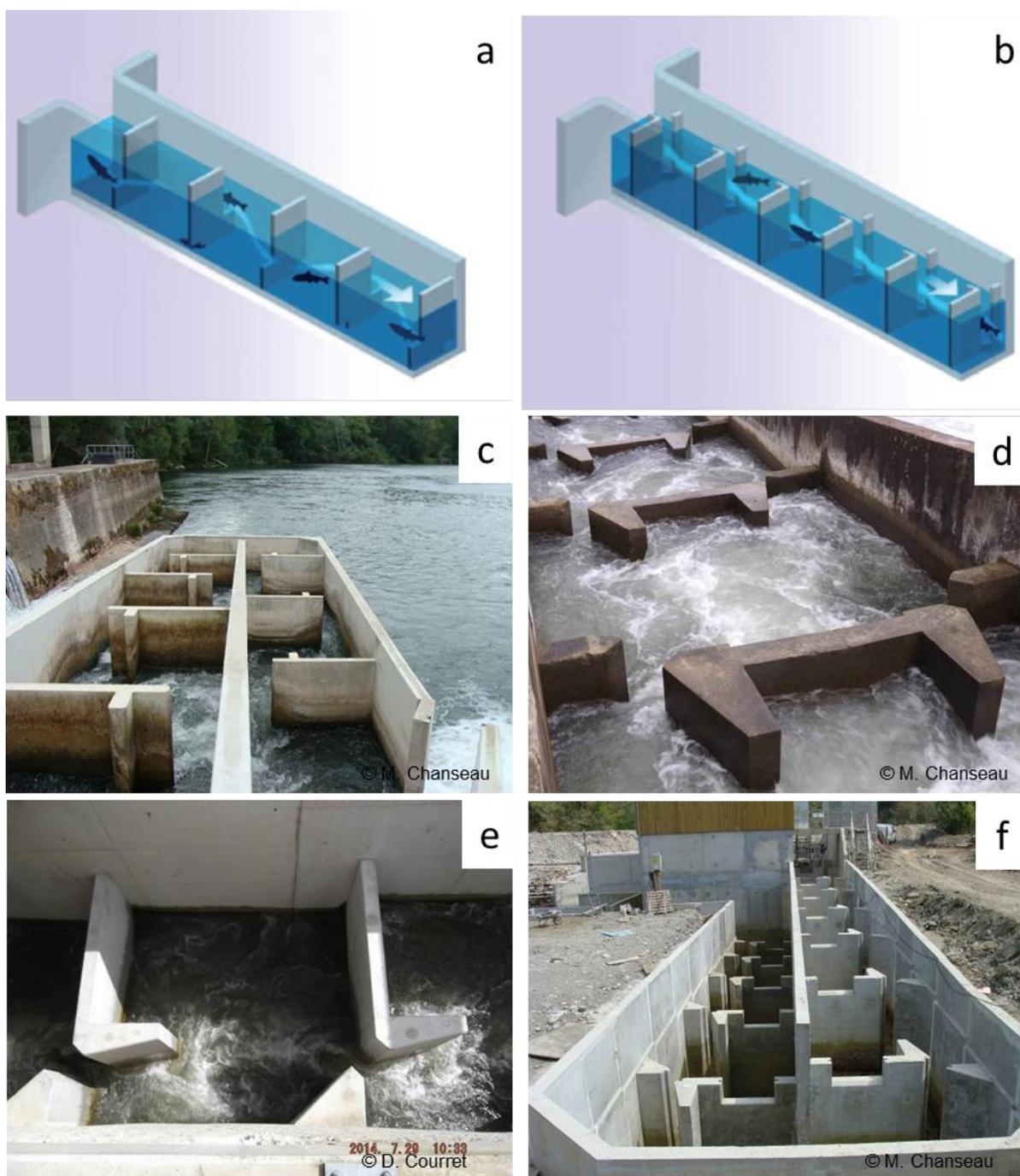


Figure 5-1 a et b) Vues schématiques de passes à bassins à échancrure latérale alternée et à fente verticale (Baudoin, et al., 2014). c) Passe à échancrure latérale au seuil de Montans – Saint Sauveur sur le Tarn. d) Passe à double fentes verticales d'Augreilh sur l'Adour. e) Passe à simple fente verticale au seuil de la Cavaletade sur la Garonne. f) Virage au niveau de la passe à fente verticale de l'usine de Maseys sur le gave d'Oloron.

5.7.2 PRÉ-BARRAGES

Les prébarrages constituent une variante des passes à bassins dans laquelle les cloisons sont formées de plusieurs murs ou seuils créant à l'aval de l'obstacle des grands bassins et fractionnent la chute à franchir. Ce type de dispositif est généralement installé sur des ouvrages présentant des hauteurs de chute limitées, de l'ordre de 1,0-1,5 m. Si dans les grands principes, le dimensionnement est comparable à celui des passes à bassins, les débits mobilisés sont généralement plus importants et il peut être admis des critères qui dépassent quelque peu les valeurs préconisées pour ces dernières (Larinier et *al.*, 1994) en ce qui concerne notamment les puissances volumiques dissipées. En effet, les bassins sont alors souvent de grandes dimensions tandis que le nombre de chutes à franchir est limité. Les communications entre bassins étant parfois peu profondes, il conviendra de bien veiller à l'obtention d'un jet de surface.

5.7.3 PASSES « NATURELLES » OU EN ENROCHEMENTS

Les passes « naturelles » ou rustiques consistent à relier les biefs amont et aval par un chenal plus ou moins large dans lequel l'énergie est dissipée et les vitesses sont réduites par la rugosité du fond et des parois et/ou par une succession de singularités plus ou moins régulièrement réparties. Les recommandations seront notamment reprises des travaux de Larinier et *al.* (1995), Larinier et *al.* (2006), Cassan et *al.* (2014) et Tran (2015). Il est toutefois à noter qu'il n'existe encore que très peu de retour d'expérience sur l'efficacité de la plupart de ces dispositifs pour les aloses (Haro et *al.*, 2008).

Différents types de dispositifs peuvent être distingués :

- les rampes en enrochements jointifs (rugosités de fond uniquement) ;
- les rampes à macrorugosités régulièrement réparties ;
- les rampes à macrorugosité en rangée périodique ;
- les rivières de contournement.

RAMPES EN ENROCHEMENTS JOINTIFS (RUGOSITÉ DE FOND UNIQUEMENT)

Ces rampes sont constituées de blocs de dimensions relativement uniformes disposés les uns contre les autres et formant un coursier rugueux. Elles n'offrent pas vraiment de zones de repos aux poissons et leur franchissement doit donc s'effectuer d'une seule traite en sprint ou en nage soutenue. Les longueurs de ces rampes franchissables par les poissons sont donc limitées selon les capacités de nage et d'endurance des poissons.

Les paramètres qui déterminent les caractéristiques de l'écoulement sur la rampe (vitesses et hauteur d'eau) sont la pente de la rampe, les caractéristiques des blocs (taille, disposition et niveau de jointoiement) et le débit par mètre de largeur.

Pour l'alose, il est préconisé de maintenir une hauteur d'eau minimale de 0,4 m et de ne pas dépasser une vitesse moyenne de l'écoulement de 2,5 m/s sur une distance de 10 m ou de 1,5-1,8 m/s sur une distance d'une vingtaine de mètres.

Ces vitesses limites sont atteintes pour des pentes de 8-10 % et 5 % respectivement, avec alors un franchissement possible pour des débits unitaires entre 0,5 et 0,8 m³/s/m et entre 0,4 à 1 m³/s/m. Dans tous les cas, ce type de dispositif ne permet de rattraper que des chutes de l'ordre de 1 m au maximum.

L'avantage de ces rampes est qu'elles nécessitent généralement peu d'entretien et peuvent transiter des débits conséquents. Dans la plupart des cas, la mise en place d'un dévers latéral est incontournable pour s'adapter aux variations de niveaux d'eau amont. Pour limiter les risques de concentrations des écoulements vers le point bas de la rampe, il est préconisé que la pente du dévers latéral soit inférieure ou égale à la pente longitudinale.

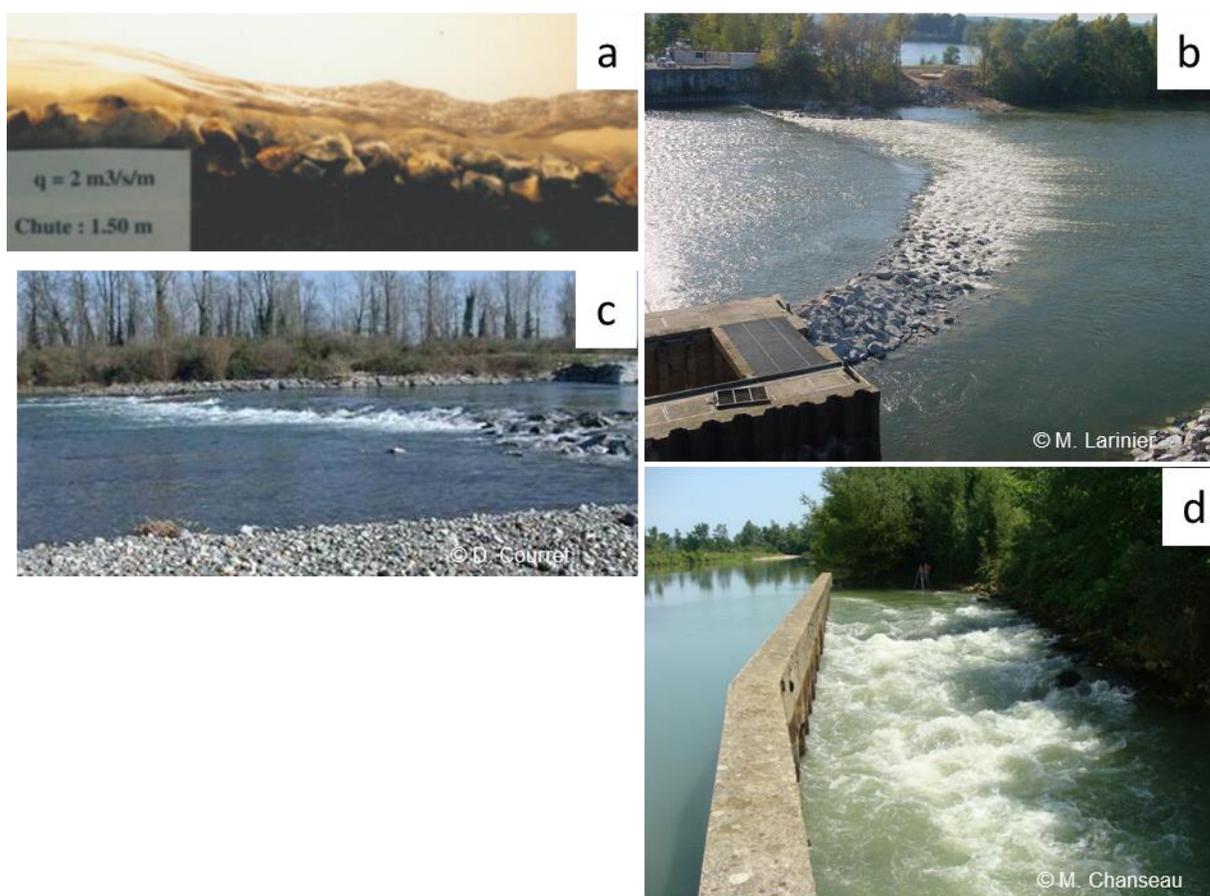


Figure 5-2 Illustrations des rampes en enrochements jointifs. a) Étude sur modèle réduit (extraite de Larinier et al. 2006) b) Rampes formant des pré-barrages au niveau du seuil de Saint-Laurent. c) Seuil franchissable par conception de Lescar sur le Gave de Pau e) Rampe au niveau du seuil de Toulouzette sur l'Adour.

RAMPES À MACRORUGOSITÉS RÉGULIÈREMENT RÉPARTIES

Dans cette configuration, l'énergie est dissipée par des singularités constituées de blocs isolés régulièrement répartis sur un coursier rugueux avec une disposition en quinconce (espacements longitudinaux et transversaux entre les blocs voisins). On obtient ainsi un écoulement pseudo-uniforme dans tout le dispositif sans apparition de singularités hydrauliques marquées (chute locale, ressaut hydraulique marqué, hauteur d'eau insuffisante) susceptibles de constituer des points de blocage à la remontée du poisson. La ligne d'eau est globalement parallèle au coursier. Chaque bloc génère un sillage qui doit pouvoir constituer une zone de repos pour le poisson et qui permet de s'affranchir d'une longueur maximale de la rampe (Figure 5-3).

Les paramètres qui déterminent les caractéristiques de l'écoulement sur la rampe (vitesses et hauteur d'eau) sont la pente de la rampe, la concentration et les dimensions caractéristiques des blocs (hauteur protubérante des blocs au-dessus du coursier, largeur face à l'écoulement et forme des blocs) et le débit par mètre de largeur.

Les macrorugosités mises en place présentent généralement des largeurs face à l'écoulement comprises entre 0,4 et 0,6 m (jusqu'à 0,3 et 0,7 m) et des hauteurs protubérantes de l'ordre de 0,4 et 0,6 m (jusqu'à 0,8 m). Les concentrations en macrorugosités sont généralement voisines de 13 % (espacement d'axe à axe égal à 2,8 fois la largeur des blocs) et peuvent atteindre jusqu'à 15-16 %. Il n'y a pas d'intérêt à aller au-delà, car cela ne permet pas de réduction significative des vitesses (Tran, 2015), mais augmente par contre les risques d'obstruction.

La mise en place d'une rugosité de fond constituée de petits blocs de 0,10 à 0,25 m est importante pour diminuer les vitesses d'écoulement.

Pour l'alose, il est préconisé de maintenir une hauteur d'eau minimale de 0,4 m, ne pas dépasser une vitesse maximale dans les jets entre les blocs de 2,0 m/s et une puissance dissipée de l'ordre de 300-450 W/m³. La préconisation de puissances dissipées plus fortes que dans les passes à bassins est liée à des organisations très différentes des écoulements entre les deux types de dispositifs, avec notamment des rapports entre vitesses maximale et débitante plus faibles dans les rampes à macrorugosités.

Ces critères amènent à des pentes ne devant pas dépasser 5-6 % pour l'alose, avec un franchissement possible pour des débits unitaires entre 0,3-0,6 m³/s/m (Lariner et al., 2006). La prise en compte d'autres espèces holobiotiques amène dans la plupart des cas à adopter des pentes de 4-5 %. Ces préconisations et les résultats des tests de franchissement de Haro et al. (2008) sont concordants.

Lorsque les macrorugosités sont submergées, un écoulement à fortes vitesses se forme au-dessus et augmente sensiblement les vitesses et les niveaux d'agitations à l'intérieur des blocs. C'est pourquoi il est considéré que les portions où les blocs sont submergés ne sont plus propices au franchissement des poissons. Il est donc préconisé de conserver, sur toute la gamme de fonctionnalité visée, une « tranche » de la rampe dont les macrorugosités ne sont pas submergées, d'une largeur minimale correspondant à un motif d'écoulement; soit 2 à 3 fois la largeur des blocs (1-1,5 m).

L'adaptation aux variations de niveau d'eau amont peut se faire :

- en adoptant des macrorugosités suffisamment hautes pour rester émergentes pour le niveau d'eau amont maximum. Entre les hauteurs d'eau minimales à assurer (0,2-0,4 m selon les espèces) et les hauteurs maximales des blocs du fait des contraintes de fourniture, de stabilité et de risque d'obstruction (0,6, voire 0,8 m), les possibilités d'adaptation sont toutefois limitées à des variations des niveaux d'eau de l'ordre de 0,2-0,3 m ;
- dans la plupart des cas, en mettant en place un dévers latéral. De manière sécuritaire, il est préconisé, comme pour les rampes en enrochements jointifs, que la pente du dévers latéral soit inférieure ou égale à la pente longitudinale. Toutefois, il semble possible d'adopter des valeurs quelque peu supérieures sans vraiment perturber les écoulements, notamment jusqu'à une dizaine de pourcents pour les rampes courtes (faibles chutes). La mise en place d'un dévers latéral est en outre intéressante pour l'attractivité du dispositif, avec une forte augmentation du débit transité lorsque le niveau d'eau amont monte et submerge la partie basse de la rampe.

Globalement, les rampes à macrorugosités régulièrement réparties construites en France présentent des largeurs variant entre 2,5-3 m et 12-15 m. Les débits transités pour le niveau d'eau amont minimum (étiage) varient entre 0,2-0,3 m³/s et plusieurs m³/s. Ces débits sont généralement multipliés par un facteur de 3 à 5 pour le niveau d'eau amont maximum (2-3 fois le module).

Pour constituer les macrorugosités, il n'était initialement envisagé que le recours à des enrochements choisis en carrière dont on ne maîtrise pas exactement la forme. C'est pourquoi il a été produit deux

séries de lois d'écoulement pour blocs à face amont plane et à face amont arrondie, de façon à encadrer les incertitudes liées à la variabilité des formes des enrochements (Lariner et al., 2006). En France, devant les difficultés à trouver les nombres de blocs nécessaires en carrière, il est de plus en plus, et même majoritairement fait appel à des macrorugosités préfabriquées dont on maîtrise alors parfaitement la forme. À ce jour, il n'y a pas de préconisations sur la meilleure forme (circulaire ou rectangulaire) à adopter vis-à-vis du franchissement des espèces, chacune ayant des avantages et des inconvénients. Des tests de franchissement prévus en 2017 et 2018 par le Pôle Ecohydraulique ONEMA-IMFT devraient amener des éléments de réponse.

Il est préconisé que les rampes à macrorugosités soient rectilignes et que les éventuels changements de direction soient traités au niveau de bassins intermédiaires. Pour de faibles angles, des virages progressifs avec de grands rayons de courbure peuvent être envisagés. Dans le cas de rampes dépassant 30 à 40 m de longueur, il a parfois été inséré un bassin à mi-parcours pour offrir une zone de repos plus grande et plus calme que celles présentes dans les sillages des macrorugosités.

Les écoulements peuvent apparaître relativement aérés et questionner vis-à-vis du franchissement des aloses. Le niveau d'aération reste toutefois bien moindre et davantage en surface que dans les passes à ralentisseurs.

La mise en œuvre des rampes à macrorugosités régulièrement réparties est généralement limitée aux obstacles dont les chutes restent inférieures à 2-3 m (soit 40 à 60 m de rampe à 5 %), du fait des tailles importantes des rampes engendrant des coûts élevés et des difficultés d'implantation.

Il n'existe pas à notre connaissance de suivis permettant de déterminer l'efficacité de ce type de passe pour les aloses. Haro et al. (2008) et Franklin et al. (2012) ont toutefois réalisé des expérimentations sur les rivières Town Brook et East River sur le gaspareau (*Alosa pseudoharengus*) au niveau de dispositifs très comparables à des rampes rustiques à enrochements régulièrement répartis. Même si le comportement de cette espèce paraît très différent de celui des aloses américaine et européenne, les principaux résultats obtenus semblent utiles à présenter succinctement ici. Sur la rivière Town Brook, l'efficacité de la rampe (32 m de long, pente moyenne de 4,2 %) est de 94 % et près de 94 % des poissons franchissent l'ouvrage lors de leur première tentative. La durée médiane de présence dans le dispositif est de l'ordre de 11 minutes. Sur la rivière East River, deux rampes présentant des pentes de 7,9 % et 3,5 % ont été testées. Leur efficacité respective est de 71 % et 99 %.

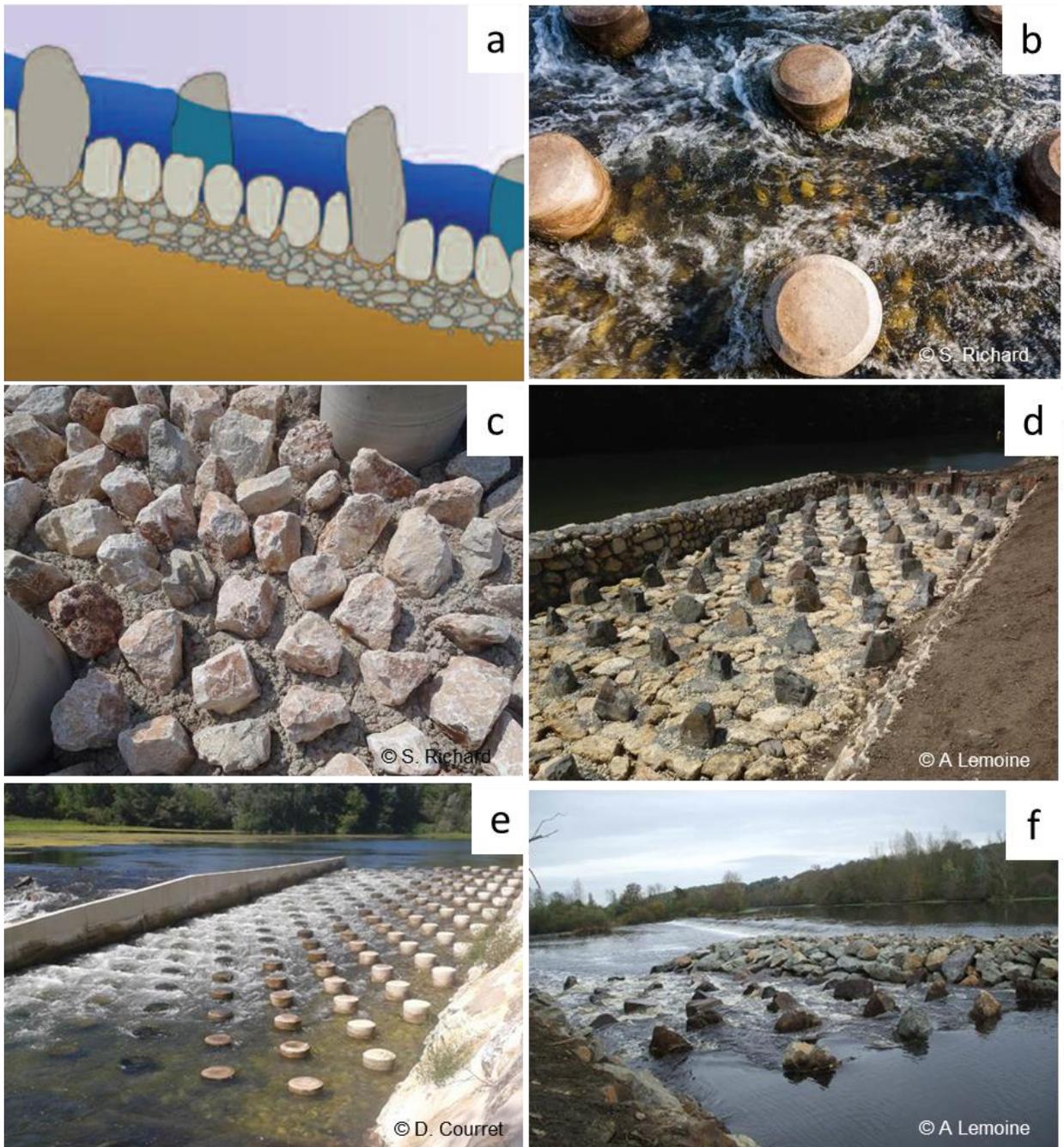


Figure 5-3 Illustrations des rampes à macrorugosités régulièrement réparties. a) Coupe longitudinale schématique (Baudoin, et al., 2014). b et c) Détails des écoulements et d'une rugosité de fond. d) Rampe de Bourg-Charente sur la Charente (hors d'eau). e) Rampe de Malhaute sur l'Orb. f) Rampe de Goux-Villar sur la Vienne.

RAMPES EN ENROCHEMENTS DISPOSÉS EN RANGÉES PÉRIODIQUES

En disposant les enrochements en rangées à intervalles réguliers, cela permet d'obtenir des pseudo-bassins entre les rangées et des chutes localisées au niveau des rangées. Ce type de dispositif est ainsi très voisin d'une passe à bassins "classique" et les critères de dimensionnement sont quasi-identiques. L'intérêt de ces dispositifs est de venir s'insérer dans des environnements non bâtis, avec la possibilité de leur donner de grandes largeurs.

Dans la mesure où ces passes peuvent présenter des largeurs importantes, et limiter ainsi les réticences des poissons à s'y engager, des hauteurs d'eau dans les bassins inférieures à celles préconisées pour les passes à bassins "classiques" sont envisageables. Une hauteur minimale de 0,4 m est préconisée pour l'alose, comme dans le cas des rampes à macrorugosités régulièrement réparties, en allant si possible au-delà.

La porosité et le calage en altitude des différentes cloisons ne pouvant être très précis, une certaine marge doit être prise sur les chutes entre bassins lors du dimensionnement. C'est pourquoi il est préconisé pour l'alose de dimensionner les dispositifs pour des chutes entre rangées 0,20 m. La prise en compte de plus petites espèces amène à rechercher des chutes de 0,15 m.

Les communications entre bassins étant parfois peu profondes, il conviendra de bien veiller à l'obtention d'un jet de surface.

L'organisation des enrochements en rangées périodiques permet globalement d'adopter des pentes longitudinales supérieures de 1 % à celles des rampes à macrorugosités, soit jusqu'à 6-7 % pour les aloses. La prise en compte d'autres espèces holobiotiques amène dans la plupart des cas à adopter des pentes de l'ordre de 5 %.

L'adaptation aux variations de niveau d'eau amont peut se faire, comme pour les rampes à macrorugosités régulièrement réparties, soit par la hauteur des blocs, soit par la mise en place d'un dévers latéral.

Les suivis réalisés sur la rivière Cap Fear aux États-Unis sur le site de Lock and Dam 1 après la mise en place d'une rampe rustique a révélé un taux d'efficacité pour l'alose américaine de 50 % en 2013 et près de 70 % en 2014 (Raabe et *al.*, undated). Les caractéristiques précises du dispositif ne sont pas disponibles et seule la valeur de la pente moyenne, comprise entre 3 % et 5 %, est précisée.

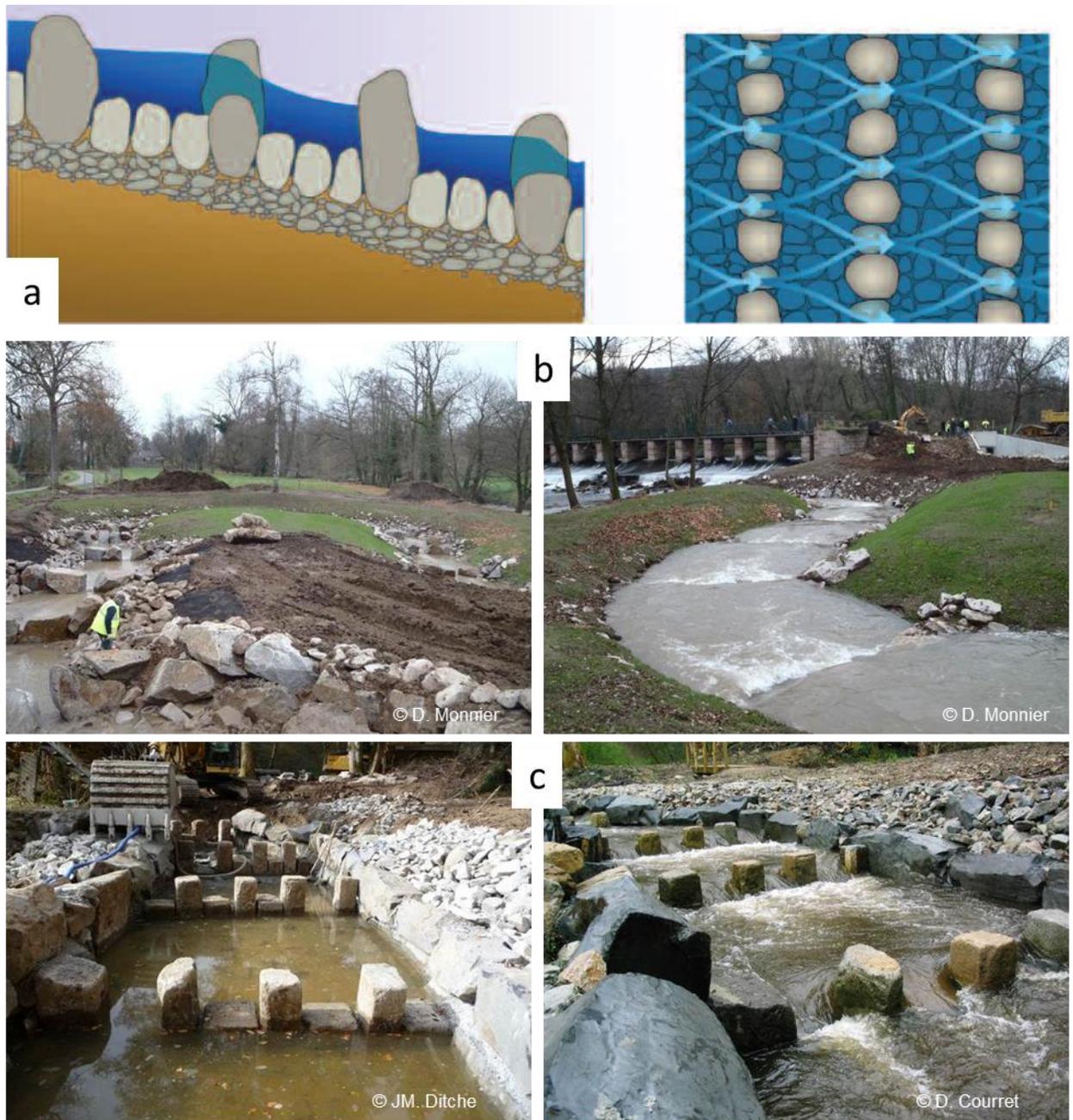


Figure 5-4 Illustrations des rampes à macrorugosités en rangées périodiques. a) Représentations schématiques (Baudoin et *al.*, 2014). b) Rivière de contournement avec rangées périodiques à Avolsheim sur la Bruche. c) Passe de la Bessette sur la Diège.

RIVIÈRES DE CONTOURNEMENT

Lorsqu'il existe de l'espace disponible en berge, le dispositif peut être implanté sous la forme d'un chenal en contournement de l'obstacle.

Si la pente du chenal est supérieure à 3-4%, il est nécessaire de faire appel à une organisation « stricte » des structures, sous forme de passes à bassins rustiques ou d'enrochements régulièrement répartis, pour bien dissiper l'énergie de l'écoulement et réduire les vitesses.

En revanche, lorsqu'il est possible de déployer un linéaire important et d'abaisser la pente du chenal en deçà de 2-3%, on dispose alors de plus de liberté sur le mode de dissipation de l'énergie de l'écoulement, ce qui permet de se rapprocher d'un écoulement d'un tronçon de rivière (d'où le terme de rivière de contournement) (Figure 5-5). L'énergie peut être dissipée par la rugosité de fond et de forme (sinuosité) du chenal, plus des singularités constituées d'épis latéraux et de gros blocs isolés. Il n'existe pas de critères de dimensionnement bien formalisés. Le dimensionnement peut s'effectuer par analogie avec des rivières de contournement existantes, ou en faisant appel à des modélisations physiques ou numériques.

Les débits transitant dans les rivières de contournement, et corollairement les tailles des chenaux, peuvent être importants et atteindre plusieurs m^3/s . Si l'entrée piscicole est bien positionnée, c'est un type de dispositif qui peut se révéler parmi les plus efficaces, les poissons éprouvant peu de réticences à s'engager à l'intérieur (transition progressive, peu d'effet de confinement) et aucune ou très peu de difficultés à progresser dans l'ouvrage. Dans le cas de dispositifs présentant des longueurs importantes, il conviendra toutefois de veiller à ce que les poissons disposent de zones de repos plus calmes.

La longueur importante du chenal nécessaire pour réduire la pente pourrait fréquemment conduire à déporter l'entrée piscicole loin à l'aval de l'obstacle. Il est rappelé que le positionnement de l'entrée piscicole à proximité du pied de l'obstacle est primordial pour l'efficacité. Si cela n'est pas possible avec une rivière de contournement, il faut soit envisager un autre type de dispositif, soit compenser la mauvaise position de l'entrée par une augmentation significative de débit en relation avec les débits concurrents.



Figure 5-5 Illustrations des rivières de contournement à faible pente. a) Rivière de Biron sur le Gave de Pau ; b) Rivière de Livron sur la Drome

5.7.4 ASCENSEURS

Dans son principe, un ascenseur à poissons est un système mécanique qui consiste à capturer les poissons au pied de l'obstacle dans une cuve contenant une quantité d'eau appropriée à leur nombre, puis à remonter cette cuve et à la déverser en amont. Les migrateurs sont attirés dans un bassin de piégeage (ou de stabulation) par un débit d'attrait et y sont piégés par un dispositif anti-retour (Travade et *al.*, 1992) (Figure 5-6 et Figure 5-7). La plupart des recommandations formulées ci-après sont issues de Travade et Larinier (2002) et Orvis et *al.* (2016).

Les points de conception et de dimensionnement les plus cruciaux portent sur :

→ Le système anti-retour qui permet la capture des poissons :

Le système anti-retour consiste en un dispositif de deux grilles disposées en V pour former un entonnement avec la pointe vers l'amont (Figure 5-7). Il est destiné à permettre aux poissons de pénétrer facilement dans le bassin de stabulation mais à réduire les risques de ressortie.

La largeur de la zone de passage entre les deux grilles doit ainsi être suffisante pour limiter les réticences des poissons, mais pas trop importante pour éviter qu'ils ne ressortent. Des largeurs très différentes ont été observées sur les aménagements de la côte Est des États-Unis (entre 0,3 et 1,0 m) sans qu'il soit

possible de déterminer celles qui sont les plus adaptées (voir section 4.4.2.4.). A ce jour, un espacement compris entre 0,3 m et 0,4 m paraît adapté.

Une vitesse de l'ordre de 0,6 m/s à 1 m/s doit également être maintenue au travers du système pour y attirer le poisson.

La configuration de l'entonnement revêt une importance particulière même s'il n'existe pas *a priori* de critères précis de dimensionnement. Nous recommandons de garantir un rétrécissement très progressif vers l'amont du système anti-retour. La modification du système d'entonnement testée à Lawrence sur la Merrimack (transformation du système initial en V sous forme d'une chicane par la fermeture partielle d'une des deux grilles) n'a pas pu vraiment être évaluée.

Pour limiter les perturbations de l'écoulement, il est préférable d'orienter les éléments de structure du système anti-retour dans le sens des écoulements.

→ Le volume d'eau du bassin de stabulation et de la cuve de relevage, en lien avec la fréquence de relevage :

Les conditions de stabulation des poissons dans les systèmes de piégeage doivent être adaptées aux capacités des individus et à leur déplacement en bancs, en limitant la fatigue et le stress des individus. Sur la plupart des ascenseurs à aloses, en raison du nombre important de poissons susceptibles de pénétrer dans le dispositif, il existe un bassin de stabulation en aval de la cuve. Un système de concentration (grille montée sur un chariot mobile) permet alors d'amener les poissons dans la cuve avant son relevage.

Afin de limiter la fatigue des poissons, les vitesses d'écoulement dans le bassin de stabulation doivent demeurer inférieures à 0,5 m/s. La fréquence des remontées de la cuve doit être assez rapide lors de la principale période de migration de l'espèce. Des cycles de 15 minutes, et dans tous les cas inférieurs à 30 minutes, peuvent être retenus (Travade et Larinier, 2002 ; Orvis et al., 2016).

Les volumes d'eau disponibles doivent prendre en compte l'importance des migrations. Des volumes minimum de 30 litres par poisson dans les bassins de stabulation et de 10 - 15 litres par poisson dans les cuves de levage doivent être garantis.

Afin de dimensionner correctement les dispositifs, il convient de connaître les rythmes de migration des poissons. En France, Chanseau et al. (2000) ont montré au niveau des ascenseurs de Golfech sur la Garonne et de Tuilières sur la Garonne que :

- les pics journaliers représentent respectivement en moyenne 9,9% (min. : 6,7% ; max. : 20%) et 11,5% (min. : 5,1% ; max. : 21,4%) des migrations annuelles ;
- les pics horaires représentent respectivement en moyenne 12,7% (min. : 9,7% ; max. : 14,7%) et 12,6% (min. : 8% ; max. : 20,5%) des effectifs journaliers maximum.

Aux États-Unis, les analyses réalisés dans le cadre de ce rapport révèlent, sur la base des passages observés dans les passes à bassins de l'ouvrage de Bonneville sur la rivière Columbia, sur la période 2006 – 2015 durant laquelle plus de 22 millions d'aloses ont été comptabilisées, que les passages journaliers maximum observés correspondent en moyenne à 7,2% (min. : 4,6% ; max. : 10,4%) de la migration annuelle. A Holyoke, sur la rivière Connecticut, sur la période 1976-2015 durant laquelle plus de 12 millions ont empruntés le dispositif, les passages journaliers maximum observés sont en moyenne de 9,8% (min. : 5,8% ; max. : 16,6%).

Ainsi, il paraît possible de retenir dans la plupart des cas pour le dimensionnement des dispositifs une migration journalière maximale correspondant à environ 10% de la migration annuelle et une migration horaire correspondant à 15% de la migration journalière maximale. Dans ces conditions, pour une durée de cycle de 15 minutes, les volumes des bassins de stabulation et de la cuve de relevage doivent être respectivement de l'ordre de 11 m^3 et 4 m^3 pour garantir des conditions de franchissement satisfaisantes pour 100 000 individus. Travade et Larinier (2002) recommandent toutefois des dimensions minimales des bassins de stabulation de $5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$, soit un volume de 19 m^3 .

Enfin, les eaux injectées dans le bassin de stabulation doivent être peu aérées (voir injection du débit d'attrait à la section 5.5) et les écoulements peu perturbés. Les risques de blessures doivent être minimisés au niveau de toutes les parties mobiles et les angles saillants doivent être proscrits. Comme indiqué par NOAA (2012), il convient également de limiter le bruit et les vibrations dans l'ouvrage et de conserver une luminosité suffisante. La forme de la cuve doit être optimisée afin de permettre une sortie rapide des poissons.

De nombreux paramètres sont susceptibles d'intervenir dans le choix de la mise en place d'un ascenseur. La hauteur de chute à franchir mais aussi la configuration des berges à proximité du lieu d'implantation constituent toutefois souvent les premiers d'entre eux. En France comme aux États-Unis (Haro, com. pers. ; NOAA, 2012), il est généralement considéré que pour des chutes supérieures à 8 – 10 m, l'ascenseur est le dispositif le plus adapté pour l'alose, à la fois pour des raisons biologiques et financières. Il convient toutefois d'avoir bien conscience qu'un système d'ascenseur nécessite une maintenance et un entretien important.

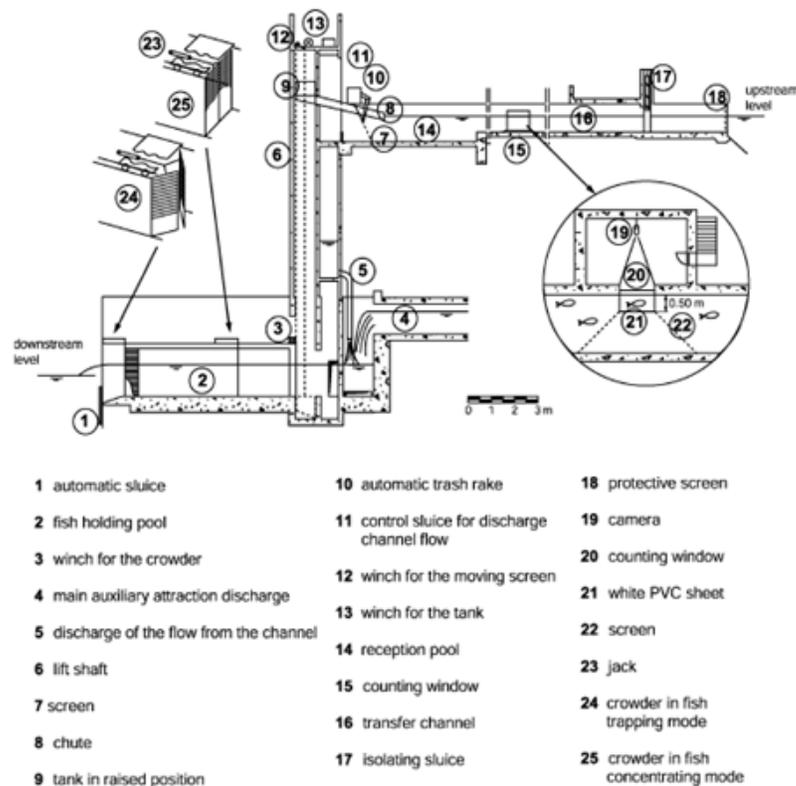


Figure 5-6 Illustrations des ascenseurs. Représentation schématique (extrait de Travade et Larinier, 2002).

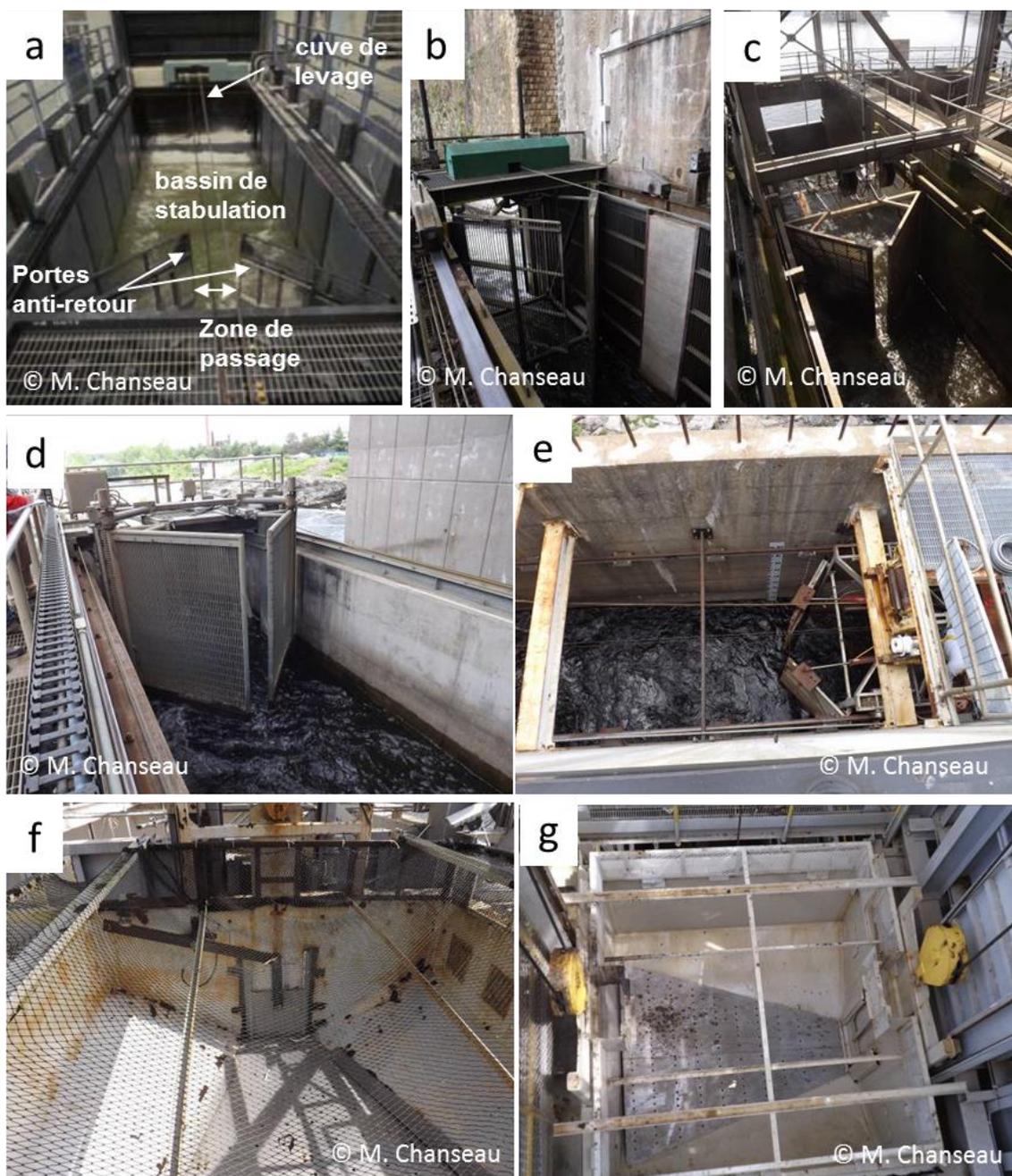


Figure 5-7 Illustrations des ascenseurs (zone de passage, anti-retour, bassin de stabulation et cuve de relevage) a) Golfech sur la Garonne b) Tuilières sur la Dordogne c) Conowingo sur la Susquehanna d) Holyoke (usine) sur la Connecticut e) Lowell sur la Merrimack f) Cuve de Conowingo g) Cuve de Holtwood sur la Susquehanna.

5.7.5 ÉCLUSES DE NAVIGATION

Travade et Larinier (2002) indiquent que les écluses de navigation peuvent constituer un appoint non négligeable, voire une alternative intéressante à la construction d'un dispositif de franchissement sur les ouvrages existants à la condition d'adapter leur gestion pour les poissons.

Les études présentées dans le cadre de ce travail en France et aux États-Unis ont révélé des efficacités variables allant de moins de 20% à plus de 80%.

Plusieurs conditions doivent être respectées afin d'espérer obtenir une bonne efficacité :

- le dispositif doit être correctement situé au niveau de l'ouvrage et ne doit pas déboucher trop en aval de l'obstacle ;
- le débit d'attrait, souvent délivré par les vannes de remplissage, doit être suffisant par rapport aux débits concurrents ;
- le nombre d'éclusées doit être suffisant, ce qui est souvent problématique au regard des contraintes liées à la navigation fluviale.

Des difficultés pour stationner suffisamment de temps dans les dispositifs lors de la phase d'attrait sont parfois apparues (en particulier sur la rivière Cape Fear au niveau de Lock and dam 1). Une modification de l'ouverture des portes aval ou une augmentation du nombre d'éclusées peuvent réduire les problèmes.

Dans la majorité des cas, toutes les conditions ne sont pas remplies et ne permettent pas d'envisager une efficacité suffisante des écluses. Les contraintes liées à la navigation fluviale, souvent prioritaires par rapport aux contraintes piscicoles, limitent l'intérêt de ce type de dispositif. Sur certains cours d'eau toutefois comme le Rhône (Larinier et Chanseau, 2009), l'utilisation des écluses existantes s'est avérée la stratégie la plus adaptée.

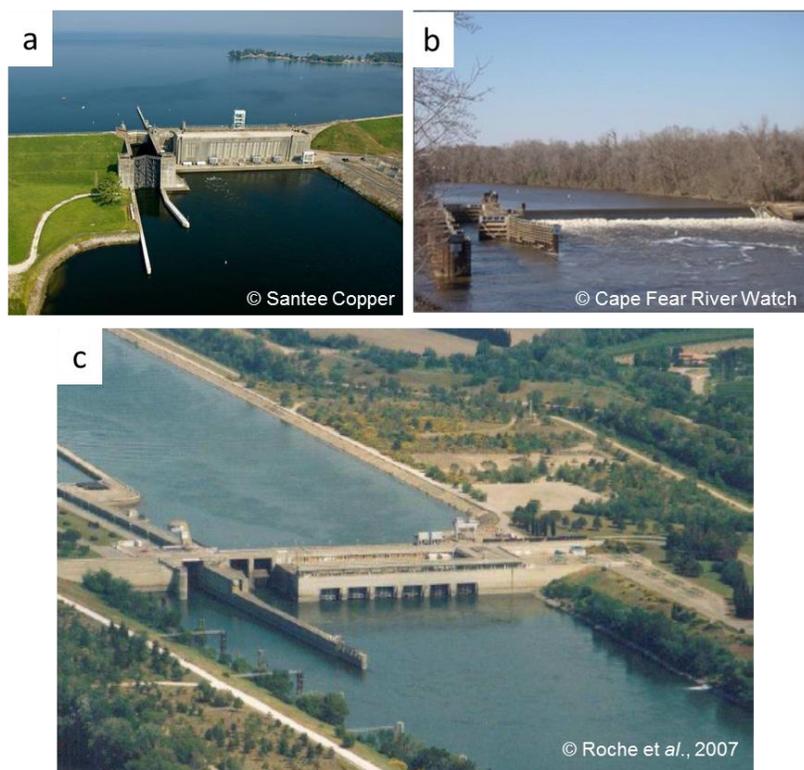


Figure 5-8 Illustrations des écluses de navigation. a) Écluse de Pinopolis sur la rivière Cooper (US) b) Lock and dam 1 sur la rivière Cape Fear (US) c) Écluse de Beaucaire sur le Rhône (France).

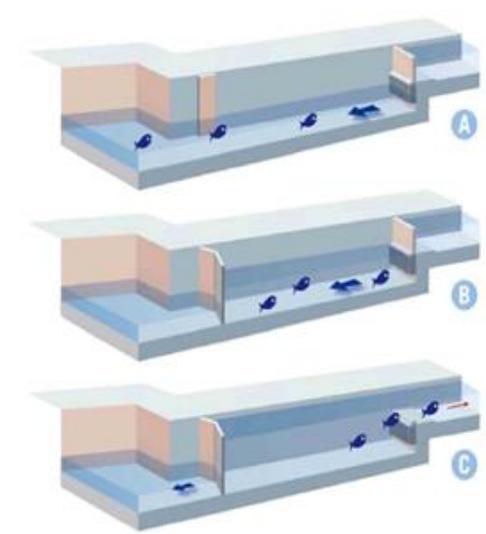


Figure 5-9 Principe de fonctionnement des écluses de navigation pour le franchissement des poissons. Exemple des écluses du Rhône (Zylberblat et al., 2011). a) Attrait des poissons ; b) Fermeture des portes ; c) Sortie des poissons.

5.7.6 CHOIX DU TYPE DE DISPOSITIF

Le choix du type de dispositif s'appuie sur de nombreux paramètres parmi lesquels, d'un point de vue piscicole :

- L'emplacement de la ou des entrée(s) piscicole(s) défini préalablement, et l'espace disponible dans la zone ;
- Le débit d'alimentation du dispositif ;
- La hauteur de chute à franchir ;
- Les variations des niveaux d'eau amont et aval en fonction de l'hydrologie, sur la gamme de fonctionnalité retenue.

Le positionnement des entrées et les débits à transiter étant déterminants pour l'attractivité et l'efficacité du dispositif, on choisira le type de dispositif permettant de satisfaire au mieux les objectifs visés. Au niveau des centrales hydroélectriques, les contraintes de places liées à la nécessité de venir déboucher à proximité de la sortie des turbines amènent généralement à choisir une passe à bassins, voire un ascenseur dans les configurations les plus contraintes. S'il ne s'avère pas possible de positionner correctement les entrées, il conviendra alors envisager d'augmenter le débit d'alimentation du dispositif.

Vis-à-vis de la hauteur de chute, il peut être avancé que pour des hauteurs supérieures à 8 à 10 m, les ascenseurs paraissent les dispositifs les plus appropriés pour les aloses. Ils permettent d'éviter aux poissons de franchir des longueurs et un nombre de chutes trop importantes, ce qui peut limiter leur efficacité (voir section 4.4.2.2.). En outre, les coûts sont généralement plus réduits. Pour les hauteurs de chutes inférieures, on évitera autant que possible le recours aux ascenseurs du fait des fortes sujétions de maintenance et d'entretien. Les passes à bassins sont en particulier adaptées à une large gamme de hauteur de chute. Les passes « naturelles » ou en enrochements sont par contre généralement limitées à de faibles chutes en raison notamment de leur forte emprise spatiale. Pour les rampes en enrochements régulièrement répartis ou à seuils successifs, une hauteur maximale de 2 à 3 m peut être avancée dans la majorité des cas. Pour les rampes en enrochements jointifs, du fait de leur sélectivité, on se limitera à des hauteurs inférieures à 1 m. Les rivières de contournement à faibles pentes, à la condition de disposer de place en berge, pourront par contre être installées au niveau d'ouvrages présentant des hauteurs nettement supérieures.

6 CONCLUSIONS

Les obstacles érigés sur les cours d'eau exercent des impacts importants sur la migration des aloses. Comme le disaient déjà Larinier et Travade (1991 ; 2002), une efficacité de 75 % est exceptionnelle, 50 % est excellente et 10 % - 20 % est malheureusement courante.

Les recommandations formulées dans ce document sont destinées *a minima* à généraliser l'atteinte des meilleures efficacités obtenues jusqu'à présent (de l'ordre de 70% - 75 %), et, si possible, permettre d'obtenir des efficacités supérieures. Elles s'appuient en particulier sur les documents de Larinier et Travade (2002), NMFS (2011), Towler et *al.* (2015) et Orvis et *al.* (2016) mais aussi sur les enseignements qui ont été acquis à la fois grâce à la revue documentaire réalisée dans le cadre du présent travail et suite aux visites et échanges effectués au printemps 2015 sur la Côte Est des États-Unis.

La migration de l'aloise étant de courte durée, l'espèce se déplaçant en bancs et présentant des capacités exploratoires plus limitées que celles d'autres espèces comme les grands salmonidés migrateurs par exemple, il est impératif de lui permettre de trouver facilement et rapidement les voies de passage, de pénétrer avec un minimum de réticence à l'intérieur des dispositifs et de se déplacer sans contrainte dans les passes.

Pour permettre aux aloses de trouver rapidement et facilement les entrées et pénétrer dans les dispositifs, il convient en particulier de :

- **mobiliser des débits conséquents** dans les dispositifs correspondant, *a minima*, à 3% à 5% des débits concurrents et plus si possible ;
- **mettre en place des voies de passage dans les différentes zones susceptibles d'être fréquentées** par les aloses. Lorsqu'il s'agit d'ouvrages hydroélectriques court-circuitant des tronçons de cours d'eau, il convient, dès lors que la centrale n'est pas suréquipée par rapport aux débits rencontrés lors de la migration, d'étudier la mise en place de deux dispositifs, l'un au barrage et l'autre à l'usine ;
- **multiplier le nombre d'entrées tout en veillant à ce qu'elles soient positionnées dans des endroits hydrauliquement peu perturbés** afin d'en garantir l'attractivité. Dès lors que les ouvrages dépassent une vingtaine de mètres de large, la mise en place de plusieurs entrées doit être étudiée. Pour des largeurs supérieures à une centaine de mètres, il paraît nécessaire dans la plupart des cas de disposer de plusieurs entrées ou dispositifs;
- **mettre en place, lorsque cela est possible, des règles de priorisation des groupes en fonctionnement pour les centrales hydroélectriques** afin d'attirer les poissons à proximité des entrées, sans pour autant en perturber l'attractivité;
- **garantir une bonne attractivité des entrées jusqu'à des débits correspondant à environ deux fois le module** des cours d'eau en maintenant des chutes de l'ordre de 0,20 – 0,25 m;
- **disposer d'entrée(s) de grandes dimensions** au regard du comportement de banc de l'espèce. Des largeur et profondeur minimales respectives de 2 m et 1,5 m peuvent être retenues, ce qui correspond à des débits par entrée de l'ordre de 5 à 6 m³/s. Dans tous les cas, on veillera, sur les cours d'eau de dimensions modestes en particulier, à disposer d'une largeur et une profondeur

minimales respectives de 1 m et 0,7 – 0,8 m, soit un débit minimum de l'ordre de 1,5 m³/s au niveau de l'entrée.

Une fois les poissons entrés dans les dispositifs, les conditions permettant un franchissement aisé et rapide de la grande majorité des individus doivent être garanties. Le choix du type de passe, les conditions hydrauliques internes et les dimensions des ouvrages en lien avec le comportement de banc de l'espèce, revêtent une importance particulière.

Les passes à ralentisseurs et les écluses qui ne fonctionnent pas à surface libre (de type Borland par exemple) ne sont pas des dispositifs à préconiser pour l'alose en raison de conditions hydrauliques internes défavorables (courants hélicoïdaux, eaux très aérées) pour les premières et d'un fonctionnement peu adaptée au comportement de l'espèce pour les secondes.

Les dispositifs qui consistent à diviser la chute totale à franchir en plusieurs chutes de hauteur réduite (passes à bassins, pré-barrages, etc.) par l'aménagement de bassins successifs peuvent permettre le franchissement des aloses. Plusieurs recommandations doivent être prises en compte :

- les **zones de passage doivent être à écoulement libre** (les orifices de fond doivent être proscrits) et doivent être situées à proximité des berges ;
- les **chutes doivent être à jet de surface** et leur hauteur comprise entre 0,20 m et 0,25 m ;
- les **puissances volumiques dissipées dans les bassins doivent être inférieures à 150 W/m³**. Pour les pré-barrages, des valeurs supérieures peuvent être acceptées dans la mesure notamment où le nombre de bassins à franchir est généralement limité ;
- le **franchissement des poissons doit être assuré sur la plus grande partie de la colonne d'eau**, ce qui nécessite la mise en place de zones de passage profondes. Par exemple, dans le cas des passes à bassins, les dispositifs à fentes verticales doivent être privilégiés ;
- les **volumes d'eau des bassins doivent être adaptés aux exigences de l'espèce**. Il peut être avancé des volumes minimum de l'ordre de 10 à 15 L par alose. Les dimensions des ouvrages doivent ainsi être adaptées à l'importance des migrations. A titre d'exemple, pour les passes à bassins, il peut être avancé des volumes minimum par bassin de 12 m³ pour assurer des conditions de passage satisfaisantes de 100 000 poissons par an.

Les ascenseurs, dont la mise en place doit être étudiée dès lors que la hauteur de chute à franchir dépasse 8 à 10 m, peuvent également permettre le passage des aloses. Il convient toutefois de veiller tout particulièrement à ce que **les volumes d'eau dans les bassins de stabulation et dans les cuves de levage correspondent a minima respectivement à 30 L et 10 – 15 L par poisson**. Leurs dimensions doivent ainsi être adaptées à l'importance des migrations. Il peut être en particulier retenu les grandes réalités suivantes : la migration journalière maximale peut correspondre à environ 10% de la migration annuelle et le pic de passage horaire représenter 15% de la migration journalière maximale. Il convient également de limiter les risques de sortie des poissons une fois qu'ils sont entrés dans les systèmes de piégeage. Pour cela, **les rythmes de remontée doivent être courts, de l'ordre de 15 minutes lors de la principale période de migration**, et dans tous les cas inférieurs à 30 minutes. Les zones de passage au niveau des systèmes anti-retour doivent présenter des caractéristiques qui limitent les réticences des poissons à rentrer dans le dispositif mais qui les empêchent de ressortir rapidement. Pour cela, nous recommandons de disposer **d'une largeur au niveau des zones de passage de l'ordre de 0,3 m à 0,4 m et d'aménager un rétrécissement très progressif vers l'amont du système anti-retour**.

Pour les passes à bassins et les ascenseurs, une attention toute particulière doit également être portée à :

- **l'injection des débits d'attrait.** Il est préconisé de répartir les débits en plusieurs points du dispositif afin de favoriser l'attractivité du débit venant de l'amont ;
- **l'absence de changement de direction marqué** susceptible de perturber les déplacements des poissons ;
- **les jonctions des différentes entrées** (au niveau des galeries collectrices aval ou au niveau de leur jonction dans le cas d'entrées séparées reliées à un même dispositif), au niveau desquelles la progression des poissons peut être perturbée et se traduire par des ressorties du dispositif. Il convient de limiter à 3 – 4 le nombre d'entrées reliées à un même canal ou un même dispositif et de veiller à l'absence de changement de direction marqué. La mise en place de déflecteurs ou de murs guideau permettant de diriger les écoulements et guider les poissons doit être systématiquement étudiée.

En ce qui concerne les écluses de navigation, elles peuvent s'avérer efficaces dans certaines situations dès lors qu'elles sont correctement positionnées, que leur fonctionnement peut être adapté pour les poissons, que les débits mobilisables sont suffisants par rapport aux débits concurrents et que les contraintes en lien avec la navigation fluviale en particulier permettent de pratiquer un nombre suffisant d'éclusées. Il est parfois apparu des problèmes de stationnement ou de ressortie des poissons dans l'ouvrage au cours des périodes d'appel. Ils peuvent être limités au besoin en optimisant la position des portes aval (réduction de la largeur de passage, fermeture d'une porte de façon à former une "chicane") et/ou en réduisant la durée des cycles.

Même s'il n'existe pas d'informations précises sur le franchissement par les aloses des dispositifs rustiques de type rampe à encochements régulièrement répartis et rampe à seuils successifs, il n'y a pas lieu de douter de leur adéquation avec les exigences des aloses si les pentes sont modérées (de l'ordre de 5% au maximum pour les premières et jusqu'à 6% au maximum pour les secondes), les tirants d'eau suffisants (a minima 0,4 m) et les chutes à jet de surface pour les seuils successifs. Ces dispositifs présentent l'avantage d'être beaucoup moins sujets aux obstructions par les flottants.

Il n'existe pas non plus de données précises sur le franchissement des rivières de contournement par les aloses. Ces dispositifs présentent souvent des efficacités très élevées pour certaines espèces comme les grands salmonidés migrateurs et paraissent adaptés à l'alose. Il faut toutefois veiller à ce que les entrées soient correctement positionnées et suffisamment attractives et les conditions hydrauliques internes adaptées (absence de chute défavorable ou de zone de mise en vitesse supérieure aux capacités des poissons, tirant d'eau suffisant, existence de zones de stationnement des poissons lorsque la longueur du dispositif est importante). Des pentes moyennes de l'ordre de 1 % à 3 %, associées à des éléments permettant de dissiper l'énergie comme des épis, des rugosités régulièrement réparties ou des seuils de faible hauteur générant des bassins, doivent permettre un franchissement élevé.

Au final, l'amélioration du franchissement des obstacles par les aloses doit intégrer toutes les difficultés auxquelles sont confrontés les poissons et nécessite souvent la mise en place de multiples voies de passage et la mobilisation de débits conséquents. Ainsi, les dispositifs à mettre en place représentent souvent des coûts de construction élevés et peuvent se traduire par des pertes de production parfois significatives au niveau des centrales hydroélectriques, en particulier sur les cours d'eau de grandes dimensions. Il ne paraît toutefois pas possible aujourd'hui, même en respectant les préconisations formulées dans ce rapport, de garantir l'atteinte d'efficacités de l'ordre de 70%-75%, en particulier sur les sites présentant des dimensions importantes.

Dans ces conditions, les impacts cumulés de quelques ouvrages sur un même axe migratoire, auxquels viennent parfois s'ajouter les prélèvements par les pêcheries et des problèmes en lien avec la fonctionnalité des habitats, sont vite très importants et rendent difficile la gestion et la restauration des populations, en particulier lorsque ces ouvrages se situent sur les parties basses des bassins, en aval des meilleures zones de reproduction des géniteurs et de croissance des juvéniles.

Il paraît nécessaire de disposer de retours d'expérience plus nombreux sur le comportement des aloses à proximité et à l'intérieur des dispositifs de franchissement, en particulier pour ceux qui répondent ou s'approchent des recommandations formulées dans ce rapport.

En France, des enseignements intéressants pourraient être tirés au niveau des passes à bassins disposant de multiples entrées construites au niveau des grandes centrales hydroélectriques du Rhin, du Rhône, de la Dordogne et de la Garonne.

Il paraît également nécessaire de mener des suivis au niveau de passes « naturelles » et en particulier de rampes à macrorugosités régulièrement réparties, dont on présume qu'elles peuvent être efficaces pour l'alose, mais pour lesquelles on ne dispose pas d'information précise (Gave d'Oloron, Charente, Vienne, Gardon, etc.).

Concernant les ascenseurs, une optimisation des systèmes d'entonnement anti-retour pourrait être recherchée (angle de l'entonnement, configuration en V ou en chicane, etc.).

Aux États-Unis, les améliorations qui seront apportées afin d'optimiser le franchissement des obstacles et les études associées dans le cadre des renouvellements d'autorisations hydroélectriques doivent être suivies (notamment à Holyoke et Turner Falls sur la Connecticut, à Lowell sur la Merrimack, à Conowingo, Holtwood et York Haven sur la Susquehanna).

7 BIBLIOGRAPHIE

- ALDEN, 2011.** Shad Upstream Passage Assessment at the Lowell Hydroelectric Project (Boott Station, FERC No2790) [Rapport] / ALDEN Research Laboratory, Inc. p. 39.
- Aprahamian M.W., Lester S.M. et Aprahamian C.D., 1998.** Shad Conservation in England and Wales. R&D Technical Report W110. Environment Agency. p. 115 + annexes. ISBN 1 85705 133 5.
- Armstrong G.S., Aprahamian M.W., Fewings G.A., Gough P.J., Reader N.A., Varallo P.V., 2010.** Environment Agency Fish Pass Manual. GEHO 0910 BTBP-E-E.
- ASMFC, 2007.** Stock Assessment Report n°07-01 (supplement) - American Shad Assessment Report for Peer Review - Volume 1. Atlantic States Marine Fisheries Commission. p. 224.
- Bach J.M., Parouty T., Leon C., Senecal A., Portafaix P., Cloastre T., Defours A., Baisez A., 2015.** Recueil de données biologiques 2014 sur les poissons migrateurs du bassin Loire [Rapport] : Rapport d'activité / LOGRAMI. p. 291.
- Baglinière J.L. et Elie P., 2000.** Les aloses (*Alosa alosa* et *Alosa fallax* spp.). Ecobiologie et variabilité des populations. Institut National de la Recherche Agronomique. p. 275.
- Barry T. et Kynard B., 1986.** Attraction of Adult American Shad to Fish Lifts at Holyoke Dam, Connecticut River. North American Journal of Fisheries Management, 6, pp. 233-241.
- Barry T. et Kynard B., 1982.** Movements of Adult American Shad (*Alosa sapidissima*) in the Holyoke Dam Tailrace During Their Spawning Migration [Rapport] / Massachusetts Cooperative Fishery Research Unit, Department of Forestry and Wildlife, University of Massachusetts.
- Baudoin J.M., Burgun V., Chanseau M., Larinier M., Sremski W., Steinbach P., Voegtli B., 2014.** Informations sur la continuité écologique - Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons - Principes et méthodes. ONEMA. p. 200. - ISBN : 979-10-91047-29-6.
- Belaud A., Dautrey R., Labat R., Lartigue J. P., Lim P., 1985.** Observations sur le comportement migratoire des Aloses (*Alosa alosa* L.) dans le canal artificiel de l'usine de Golfech. Annales Limnol., 21, Vol. 2, pp. 161-172.
- Briand C., Sauvadet B. et Eriau G., 2015.** Suivi scientifique des migrations de poissons de la passe à bassins du barrage d'Arzal (Vilaine, Morbihan). p. 37.
- Cassan L., Tran D.T., Courret D., Laurens P., Dartus D., 2014** Hydraulic resistance of emergent macroroughness at large froude numbers : Design of nature-like fishpasses [Revue] // Journal of Hydraulic Engineering. -°2014. - Vol140. – 9.
- Castro-Santos T., 2011.** Analysis of American shad passage at Vernon dam 2011. S.O. Conte Anadromous Fish Research Center. - [s.l.] : USGS-BRD-CAFRC. p. 12 .
- Castro-Santos T. et Haro A., 2014.** Gatehouse Fishway Telemetry Studies: Progress Report, 2008-2010. Results of Turners Falls Fishway Studies: 2011 / Results of Turners Falls Fishway Studies: 2012.S.O. Conte Anadromous Fish Research Center. - [s.l.] : USGS-BRD.
- Castro-Santos T., 2005.** Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes. The Journal of Experimental Biology, 208, pp. 421-432.
- Chanseau M., Castelnaud G., Carry L., Vandembulcke D., Belaud A., 2005** Essai d'évaluation du stock de géniteurs d'alose *Alosa alosa* du bassin versant Gironde-Garonne-Dordogne sur la période

1987-2001 et comparaison de différents indicateurs d'abondance. Bull. Fr. Pêche Piscic., 374, pp. 1-19.

Chanseau M., Marie F., Carry L., Gracia S., 2006. Suivi des passages de poissons migrateurs amphihalins au niveau de l'aménagement hydroélectrique EDF de Mauzac sur la Dordogne. Rapport MIGADO 23D-06-RT.

Chanseau M., Dartiguelongue J. et Larinier M., 2001. Analyse des données sur les passages enregistrés au niveau des stations de contrôle des poissons migrateurs de Golfech et du Bazacle sur la Garonne et de Tuilières sur la Dordogne. Rapport GHAAPE RA00.02 / MIGADO G14-00-RT. p. 64.

Clabough T.S., Jepson M.A., Lee S.R., Keefer M.L., Caudill C.C., Martinez-Rocha L., Renner J., Erdman C., Sullivan L., Hatch K., 2014. Radio-tagged Chinook salmon and steelhead passage behavior at Lower Monumental, Little Goose and Lower Granite. Technical Report 2014-3. U.S. Army Corps of Engineers. - Walla Walla : [s.n.]. p. 54.

COGEPOMI, 2015. Plan de Gestion des Poissons Migrateurs. Adour - cours d'eau côtiers. 2015-2019. DREAL Aquitaine.

Costa M.J., Almeida P., Domingos I. M., Costa J. L., Correia M. J., Chaves M. L., Teixeira C. M., 2001. Present status of the main shads' populations in Portugal. Bull. Fr. Pêche Piscic., 362/363, pp. 1109 – 1116.

Courret D. et Chanseau M., 2015. Migration Barriers : The French approach and the case of the Dordogne River [Conférence] // International Symposium on restoration and conservation of shads. LIFE+LIFE09NAT/DE/000008. - Bergerac : [s.n.]. .

C.T.G.R.E.F., 1981. Migration des aloses dans le bas-Rhône: observations effectuées en 1979 et 1980. Non publié. p. 10.

Dartiguelongue J., Larinier M. et Travade F., 1992. Etude du comportement de l'aloise dans la passe à poissons de l'usine de Tuilières sur la Dordogne. Study of the behaviour of shad in the fish passage facility at the Tuilières power station on the Dordogne. Conseil Supérieur de la Pêche - EDF. p. 55.

Doherty D., O'Maoilèidigh N. et McCarthy T. K., 2004. The biology, ecology and future conservation of twaite shad (*Alosa fallax* Lacépède), allis shad (*Alosa alosa* L.) and Killarney shad (*Alosa killarneyensis* Tate Regan) in Ireland. Biology and Environment : Proceedings of the Royal Irish Academy, 3, Vol. 104B. pp. 93-102.

DVWK, 2002. Fish Passes – Design, dimensions and monitoring [Rapport] / Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations in arrangement with Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau. p. 118.

FERC, 2014. Draft multi-project environmental impact statement for hydropower licenses. Susquehanna River Hydroelectric Projects. York Haven Project. Muddy Run Project. Conowingo Project. FERC/DEIS-0255D [Rapport] / Federal Energy Regulatory Commission.

Franklin, A.E.; Haro, A.; Castro-Santos, T.; Noreika, J., 2012. Evaluation of Nature-Like and Technical Fishways for the Passage of Alewives at Two Coastal Streams in New England. Transactions of the American Fisheries Society, 141, 3, pp. 624-637.

Gratton P. et Kibel P., 2015. Allis Shad Fish Passage Options Appraisal – Gunnislake Weir. [Rapport] / Fishtek Consulting. - [s.l.] : Plymouth Sound and Estuaries Special Area of Conservation (SAC). Improvement Programme for England's Natura 2000 Sites (IPENS). IPENS054. (LIFE11NAT/UK/000384IPENS). ISBN 978-1-78354-201-7.

- Greene K.E. Zimmerman J.L., Laney R.W., Thomas-Blate J.C., 2009.** Atlantic coast diadromous fish habitat : a review of utilization, threats, recommendations for conservation, and research needs. Atlantic State Marine Fisheries Commission Habitat Management. Series n°9. - Washington, D.C. : [s.n.].
- Grote, A.B.; Bailey, M.M.; Zydlewski, J.D.; Hightower, J.E., 2014.** Multibeam sonar (DIDSON) assessment of American shad (*Alosa sapidissima*) approaching a hydroelectric dam. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 71, pp. 545-558.
- Haro A., Franklin A., Castro-Santos T., Noreika J., 2008.** Design and Evaluation of Natur-Like Fishways for Passage of Northeastern Diadromous Fishes. Final Report. S.O. Conte Anadromous Fish Research Laboratory. - [s.l.] : NOAA National Marine Fisheries Service Office of Habitat Conservation. p. 31.
- Haro A. et Castro-Santos T., 2012.** Passage of American Shad: Paradigms and Realities. *Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science*, 4, 1, pp. 252-261.
- Haro A. et Kynard B., 1997.** Video evaluation of passage efficiency of American shad and sea lamprey in a modified Ice Harbor fishway; *North American Journal of Fisheries Management*, 17, pp. 981–987.
- Haro A., Castro-Santos T. et Koch C., 1999.** Passage of American Shad at Turners Falls Fishways: PIT Tag Evaluation 1999. CAFRC Internal Report No. 1999-02.CAFRC - S. O. Conte Anadromous Fish Research Center. - [s.l.] : USGS. p. 9.
- Haro A., Castro-Santos T. et Sullivan T., 2001.** Passage of American Shad at Turners Falls Fishways: PIT Tag Evaluation 2000. CAFRC Internal Report No. 2001-01. CAFRC - S. O. Conte Anadromous Fish Research Center. - [s.l.] : USGS. p. 20.
- Hasselman D.J., Hinrichsen R.A., Shields B.A., Ebbesmeyer C.C., 2012.** The Rapid Establishment, Dispersal, and Increased Abundance of Invasive American Shad in the Pacific Northwest . *Fisheries*. - [s.l.] : Taylor & Francis. 37, Vol. 3, pp. 103-114.
- Henderson P.A., 2003.** Background information on species of shad and lamprey. CCW Marine Monitoring Report No: 7. Bangor : [s.n.]. p. 30.
- Hinrichsen R.A., Hasselman D. J., Ebbesmeyer C. C., Shields B. A., 2013.** The Role of Impoundments, Temperature, and Discharge on Colonization of the Columbia River Basin, USA, by Nonindigenous American Shad. *Transactions of the American Fisheries Society*, 42, 4, pp. 887-900.
- Karlsson R., 2013.** Passage efficiency and migration behavior for adult Atlantic salmon at a Half-Ice Harbor fish ladder. Rapport de Master; Umeå: SLU, Dept. of Wildlife, Fish and Environmental Studies.
- Katopodis C. et Williams J.G., 2011.** The development of fish passage research in a historical context. *Ecol. Ing.* doi:10.1016/j.ecoleng.2011.07.004.
- Larinier M. et Travade F., 1982.** Les poissons migrateurs aux Etats-Unis ouvrages de franchissement des barrages [Rapport].
- Larinier M. et Travade F., 1992.** La conception des dispositifs de franchissement pour l'alose. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 326-327, pp. 125 – 133.
- Larinier M. et Travade F., 1994.** La conception des dispositifs de franchissement pour les aloses. Passes à poissons. Expertise et conception des ouvrages de franchissement [Ouvrage] / éd. Pêche Collection Mise au Point. Conseil Supérieur de la Pêche.
- Larinier M., Chorda J., Ferlin O., 1995** Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs[Rapport] / GHAAPPE. p. 25.

- Larinier M., 2000.** Dams and Fish Migration [Conférence] // World Commission on Dams. 30 p.
- Larinier M. et Travade F., 2002.** The design of fishways for shad. Bull. Fr. Pêche Piscic., 364 supp., pp. 135-146.
- Larinier M., Chanseau M., Bau F., Croze O., 2005.** Aquatic Telemetry Advances and Applications. Proceedings of the Fifth Conference on Fish Telemetry held in Europe [Conférence] // The use of radio telemetry for optimizing fish pass design (June 2003) / éd. Spedicato M.T., Lembo G. et Marmulla G.. - Ustica (Italy) : [s.n.]. FAO/COISPA..
- Larinier M., Courret D. et Gomes P., 2006.** Guide technique pour la conception des passes "naturelles". GHAAPPE. RA.06.05-V1.
- Larinier M., Chanseau M., 2009.** La stratégie poissons migrateurs sur le Rhône. Rapport d'expertise. Rapport GHAAPPE EX.09.01.
- Latour R.J., Hilton E.J., Lynch P.D., Tuckey T.D., Watkins B.E., Olney J.E., 2012.** Evaluating the Current Status of American Shad Stocks in Three Virginia Rivers. Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science / éd. Francis & Taylor. 4, 1, pp. 302-311.
- Lawrence Hydroelectric Associates, 2013.** Comprehensive Fish Passage Plan for the Lawrence Hydroelectric Project FERC Project N° 2800. p. 10.
- Leggett W.C. et Whitney R.R., 1972.** Water temperature and the migrations of American shad. Fishery Bulletin, 3, Vol. 70, pp. 659-670.
- Limburg K.E. et Waldman J.R., 2009.** Dramatic Declines in North Atlantic Diadromous Fishes. BioScience 955, 11, Vol. 59.
- Limburg K.E., Hattala K.A. et Kahnle A.W., 2003.** American shad in its native range. American Fisheries Society Symposium, 35, pp. 125–140.
- Litaudon A., 1985.** Observations préliminaires sur le franchissement du seuil de Saint-Laurent-des-Eaux (Loire) par l'aloise (*Alosa alosa*). EDF. p. 63. EDF Rep. HE/31/85-3.
- MacKenzie C., Weiss-Glanz L. S. et Moring J. R., 1985.** Species profiles : life histories and environmental requirements of coastal fishes and invertebrates (mid-Atlantic)-American shad. U.S. Fish Wildl. Serv. Biol. Rep. 82 (11.37). U.S. Army Corps of Engineers TR EL-82-4. 18 pp.
- Maitland P.S. et Hatton-Ellis T.W., 2000.** Ecology of the Allis and Twaite Shad. Conserving Natura 2000. Rivers Ecology Series n°3. [Revue] // English Nature. - Peterborough : [s.n.].
- Monk B., Weaver D., Thompson C., Ossiander F., 1989.** Effects of Flow and Weir Design on the Passage Behavior of American Shad and Salmonids in an Experimental Fish Ladder. North American Journal of Fisheries Management, 9, pp. 60-67.
- Moser M.L., Darazsdi A.M. et Hall J.R., 2000.** Improving Passage Efficiency of Adult American Shad at Low-Elevation Dams with Navigation Locks. North American Journal of Fisheries Management, 20, pp. 376-385.
- Mota M., 2014.** Biology and ecology of the allis shad, *Alosa alosa* (Linnaeus, 1758) in the Minho river. Tese de doutoramento em Ciências do Mar e do Ambiente. Especialidade em Planeamento e Gestão Ambiental. Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar da Universidade de Porto. p. 200.
- MRTC, 1997.** Strategic Plan and Status Review. Anadromous Fish Restoration Program. Merrimack River. Technical Committee for Anadromous Fishery Management of the Merrimack River Basin. p. 78.
- MRTC, 2010.** A Plan for the Restoration of American Shad. Merrimack River Watershed. Technical Committee for Anadromous Fishery Management of the Merrimack River Basin. p. 12.

- NMFS, 2011.** Anadromous Salmonid Passage Facility Design. National Marine Fisheries Service. - Portland, Oregon : [s.n.].
- NOAA, 2012.** Diadromous Fish Passage : A Primer on Technology, Planning, and Design for the Atlantic and Gulf Coasts.éd. Service U.S. Department of Commerce - National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) - National Marine Fisheries.
- Normandeau Associates, Inc., 2003.** Effectiveness of the Pinopolis Lock at Attracting Adult Blueback Herring and American Shad, Spring 2003. Draft. p. 19.
- Normandeau et Gomez and Sullivan, 2011.** Upstream fish passage effectiveness study rsp 3.5 Conowingo hydroelectric project ferc project number 405. Normandeau Associates, Inc.; Gomez and Sullivan Engineers, P.C.. - [s.l.] : Exelon. p. 50.
- Normandeau et Gomez and Sullivan, 2012.** Upstream fish passage effectiveness study rsp 3.5 Conowingo hydroelectric project ferc project number 405. Normandeau Associates, Inc.; Gomez and Sullivan Engineers, P.C.. - [s.l.] : Exelon. p. 69.
- Noyes C.J., 2013.** The migration and dam passage behavior of adult Pacific Lamprey (*Entosphenus Tridentatus*) and American Shad (*Alosa Sapidissima*) in the Columbia River, in relation to population decline.Thèse de doctorat / University of Idaho.
- Orvis C., Towler B. et Mulligan K., 2016.** Fish Passage Engineering Design Criteria. United States Fish and Wildlife Service. Region 5.
- Quinn R.F., 1994.** Fish Passage Facilities for Alosa. Anadromus Alosa Symposium 1994. pp. 119-127.
- Raabe J.K., Ellis T.A. et Hightower J.E., undated.** Preliminary evaluation of a rock-ramp fishway in the Cape Fear River.
- Reese L.A., 2012.** Adult Fishway Systems - Multiple Entrance Strategy, Effectiveness, and Design Considerations. Kolloquiumsreihe der BAW und BfG. Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der BWaStr - Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen - Herausforderung, Untersuch.
- Roche, P., Balle, G., Brosse, L., Delhom, J., Gomez, P., Lebel, I., Subra, S., Vanel, N., 2007.** Étude par radiopistage de la migration d'Alose dans le Rhône aval. CSP. - [s.l.] : CNR.
- Rougier, T., Lambert, P., Drouineau, H., Girardin, M., Castelnaud, G., Carry, L., Aprahamian, M., Rivot, E., Rochard, E., 2012.** Collapse of allis shad, *Alosa alosa*, in the Gironde system (southwest France) : environmental change, fishing mortality, or Allee effect. *Journal of Marine Science*. - [s.l.] : ICES, 69 (10), pp. 1802–1811.
- Scharbert, A.; Beeck, P.; Rochard, E.; St. Pierre, R.; Jatteau, P., 2011.** Management Plan to the LIFE project. The re-introduction of the Allis shad (*Alosa alosa*) to the Rhine system. Düsseldorf : LIFE. LIFE06 NAT/D/000005.
- Schmutz S. et Mielach C., 2015.** Review of Existing Research on Fish Passage through Large Dams and its Applicability to Mekong Mainstream Dams. MRC Technical Paper No. 48. Mekong River Commission. - Phnom Penh : [s.n.]. - p. 149. - ISSN: 1683-1489.
- Smith J.A. et Hightower J.E., 2012.** Effect of Low-Head Lock-and-Dam Structures on Migration and Spawning of American Shad and Striped Bass in the Cape Fear River, North Carolina [Revue] // *Transactions of the American Fisheries Society*. 141:2. - pp. 402-413.
- Sprankle K., 2005.** Interdam Movements and Passage Attraction of American Shad in the Lower Merrimack River Main Stem [Revue] // *North American Journal of Fisheries Management*., 25, pp. 1456–1466.

- Sprankle K., 2012.** U. S. Fish and Wildlife Service. Connecticut River Coordinator's Office [Conférence] / éd. Service U. S. Fish and Wildlife. p. 38.
- Steinbach P., Gueneau P., Autuoro A., Broussard D., 1986.** Radio-pistage de grandes aloses adultes en Loire. Bulletin Français Pêche Pisciculture, -302, pp. 106 – 117.
- Sullivan T., 2004.** Evaluation of the turners falls fishway complex and potential improvements for passing adult american shad [Rapport] : Thèse de doctorat / University of Massachusetts Amherst - Department of Wildlife and Fisheries Conservation.
- Sullivan T., Haro A. et Castro-Santos T., 2002.** Passage of American Shad at Turners Falls Fishways: PIT Tag Evaluation 2001. CAFRC Internal Report No. 2002-01.CAFRC - S. O. Conte Anadromous Fish Research Center. - [s.l.] : USGS..
- Tétard, S., De Oliveira, E., Schaeffer, F., Clair, B., 2014.** Étude du comportement des cyprinidés dans la passe à poissons de Gambsheim (Rhin, France). Utilisation de la technique RFID. EDF R&D. p. 65.
- Towler B. et Orvis C., 2013.** Upstream Attraction Flow Criterion. USFWS.
- Towler B. et Orvis C., 2015.** Upstream Attraction Flow Criterion. USFWS. p. 4.
- Tran D.T., 2015.** Métrologie et modélisation des écoulements à forte pente autour d'obstacles. Application au dimensionnement des passes naturelles [Rapport] : Thèse de doctorat / Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Travade, F., Larinier, M., Trivellato, D., Dartiguelongue, J., 1992.** Conception d'un ascenseur à poissons adapté à l'alose (*Alosa alosa*) sur un grand cours d'eau : l'ascenseur de Golfèch sur la Garonne [Revue] // Hydroécol. Appl.. Tome 4. Vol 1. pp. 91-119.
- Travade F. et Larinier M., 2002.** Fish locks and fish lifts. Bulletin Français Pêche Pisciculture, 364 suppl., pp. 102-118.
- Travade F., Schaeffer F. et De Oliveira E., 2013.** Comportement des salmonidés migrateurs franchissant la passe à poissons de Gambsheim (Rhin). Utilisation de la technique RFID. EDF R&D. p. 67.
- Tryniewski J.D. et Hendricks M.L., 2012.** The Lower Susquehanna River : Three Fish Lifts - Three Fish Passage Results [Conférence] / éd. Commission Pennsylvania Fish and Boat.
- USFWS, 2015.** FERC2004 - Holoyke Project. Post Construction American Shad Monitoring Plan [Courrier]. 19 03 2015.
- Verdeyroux, P., Guerri, O., Chanseau, M., Cazeaux, J., Fauvel, J., Bogun, F., Desmoulin, A., Tarrene, C., Nicole, T., Dubois, A., Raynal, J., 2015.** Étude par radiotélémetrie de la migration de la Grande alose (*Alosa alosa*) au niveau de Bergerac et Tuilières sur la Dordogne et de Golfèch sur la Garonne de 2011 à 2014 [Rapport] / Epidor. - [s.l.] : Project LIFE09 NAT/DE/000008. Action A2., p. 45.
- Wang R.W., David L. Larinier M., 2010** Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes [Revue] // Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 396, 02.
- Weaver C.R., 1965.** Observations on the swimming ability of adult American shad (*Alosa sapidissima*). Trans. Am. Fish. Soc.. 94 (4). pp. 382-385.
- Williams J. G., Armstrong G., Katopodis C., Larinier M., Travade M., 2012.** Thinking like a fish : a key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions. River Research and Applications, 4, Vol. 28, pp. 407-417. ISSN 1535-1459.
- York Haven Power Company, 2011.** York Haven hydroelectric project (ferc project no.1888) Assessment of american shad at the York Haven project . p. 17.

Zylberblat M., Roche P., Pautrat P., 2011. Le rétablissement de l'axe de migration sur le Rhône : une stratégie partagée. La Houille Blanche, n°6, p. 22-27.

Planches photos



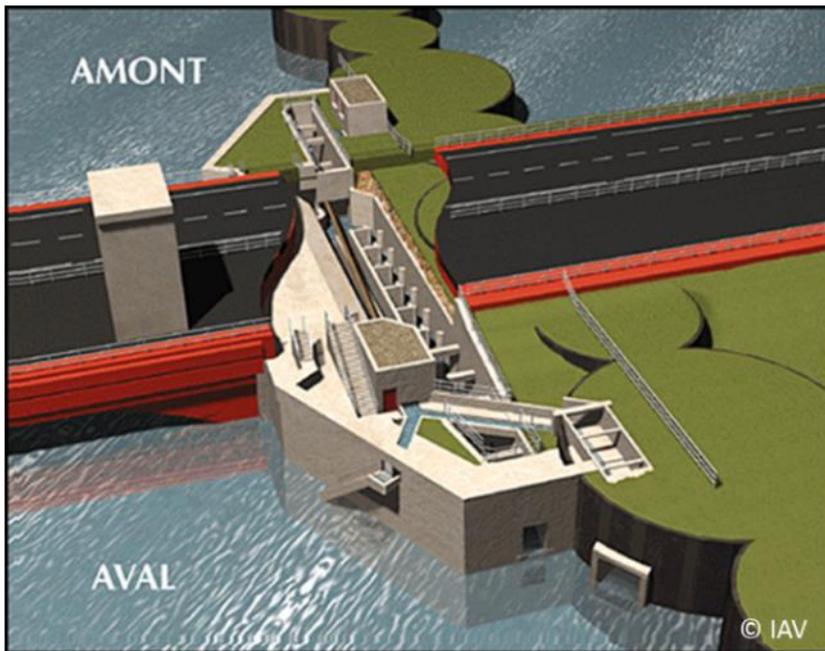
FRANCE 1 : GARONNE – GOLFECH : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'aménagement de Golfech sur la Garonne ; vue aérienne de l'usine, de l'ascenseur et des deux entrées ; vue du canal reliant l'entrée 2 à l'entrée 1 et à l'ascenseur ; vue du système anti-retour



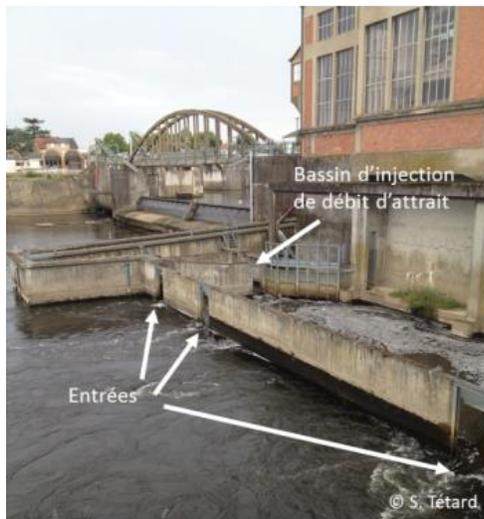
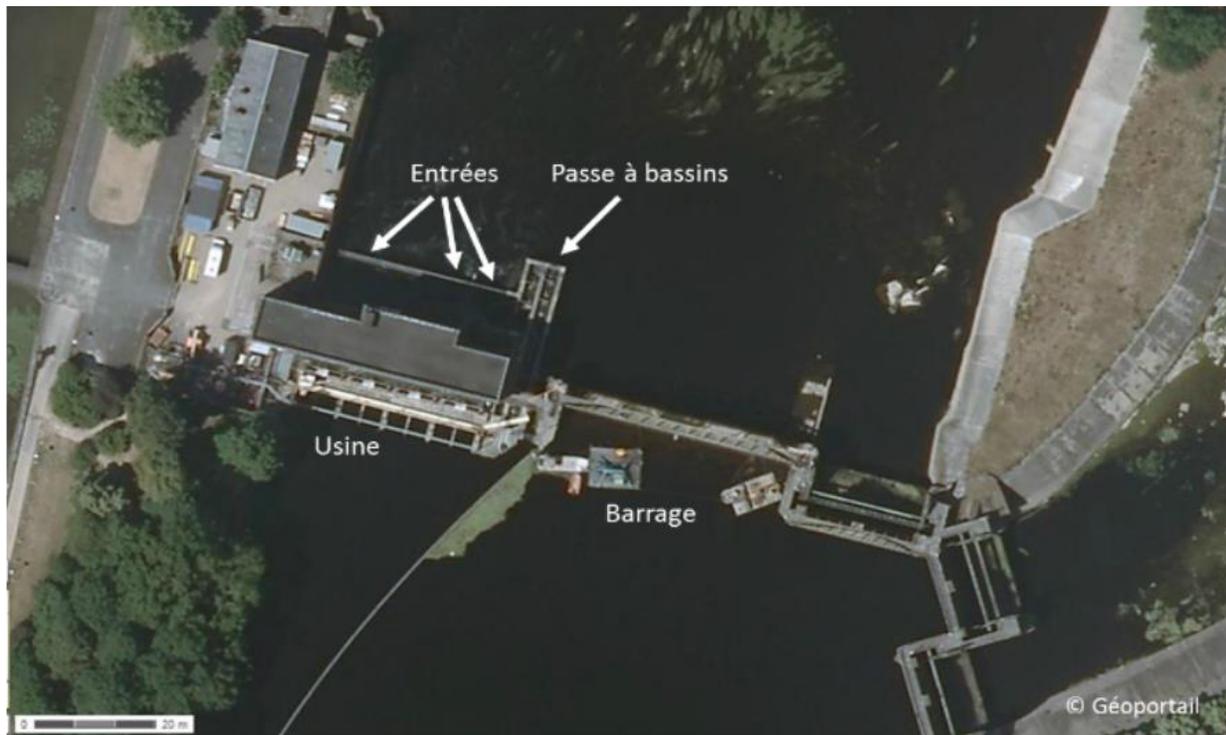
FRANCE 2 : DORDOGNE – TUILIERES : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'aménagement de Tuilières sur la Dordogne ; vue aval de l'usine, de l'ascenseur et du barrage ; vue de l'ascenseur ; vue du bassin de stabulation de l'ascenseur et du système anti-retour ; vue de la passe à bassins dans laquelle les poissons sont déversés



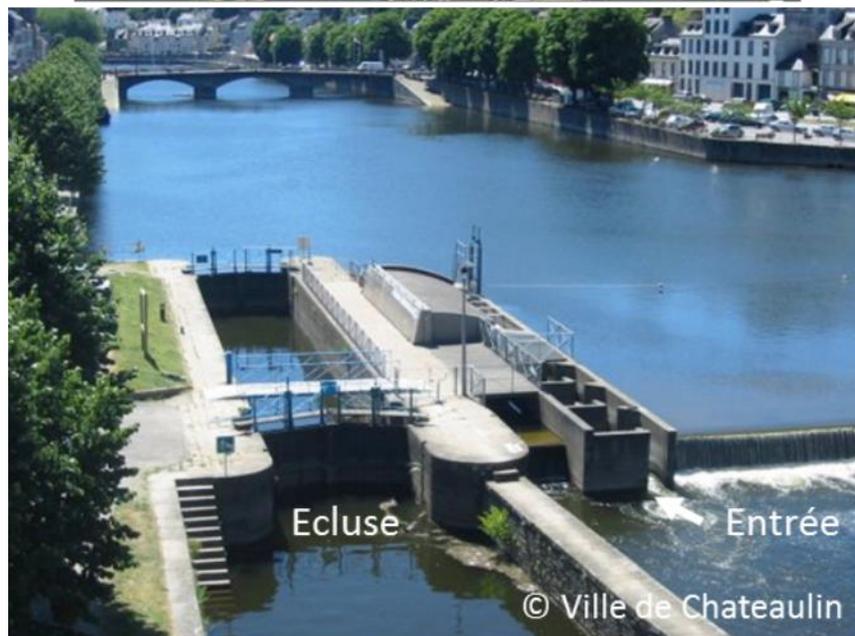
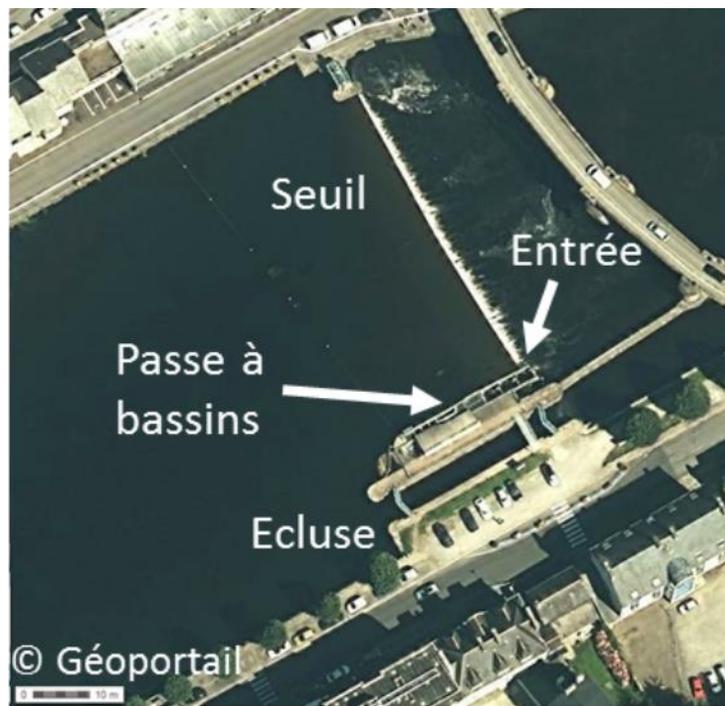
FRANCE 3 : ALLIER – VICHY : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'ouvrage de Vichy sur l'Allier ; vue du barrage de Vichy et de la passe à bassins



FRANCE 4 : VILAINE – ARZAL : (de haut en bas) : vue aérienne du barrage d'Arzal sur la Vilaine et représentation 3D de la passe à bassins



FRANCE 5 : VIENNE – CHÂTELLERAULT : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'aménagement de Châtelleraut sur la Vienne, de sa passe à bassins et des trois entrées



FRANCE 6 : AULNE – CHÂTEAULIN : (de haut en bas) : vue aérienne du barrage de Châteaulin sur l'Aulne et de sa passe à bassins



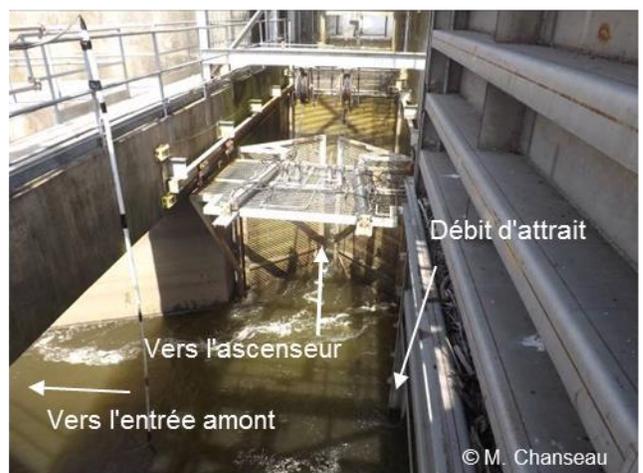
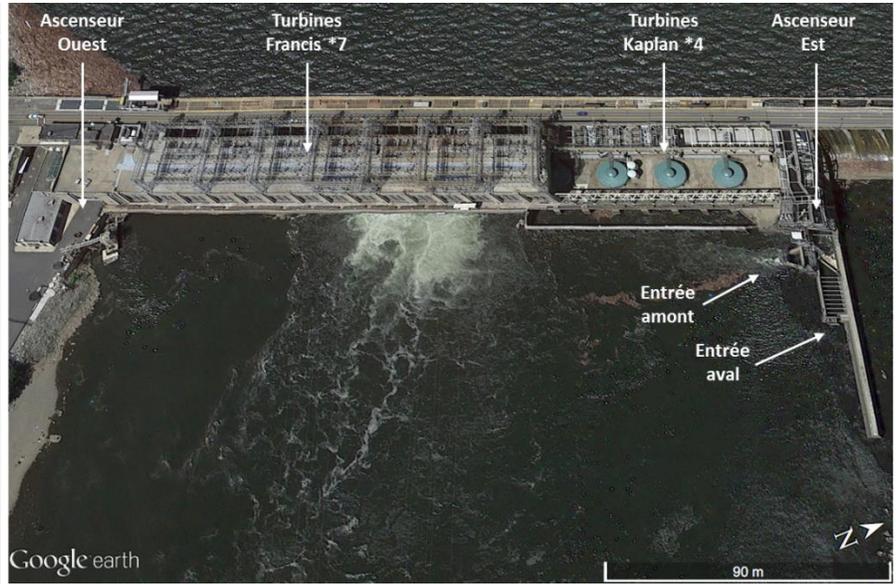
FRANCE 7 : CREUSE – DESCARTES : (de haut en bas) : vue aérienne de l'ouvrage de Descartes sur la Creuse et de l'entrée de la passe à bassins



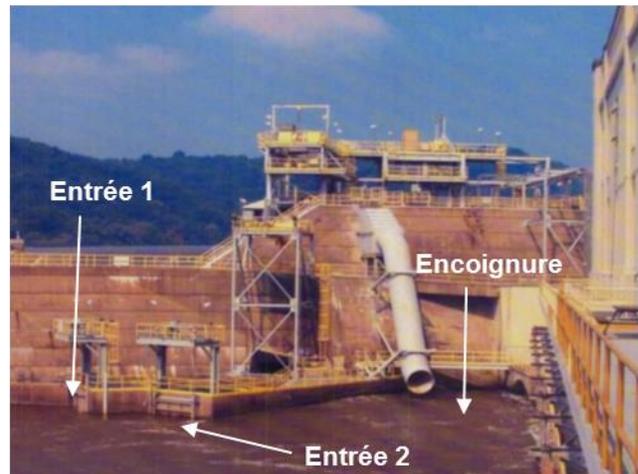
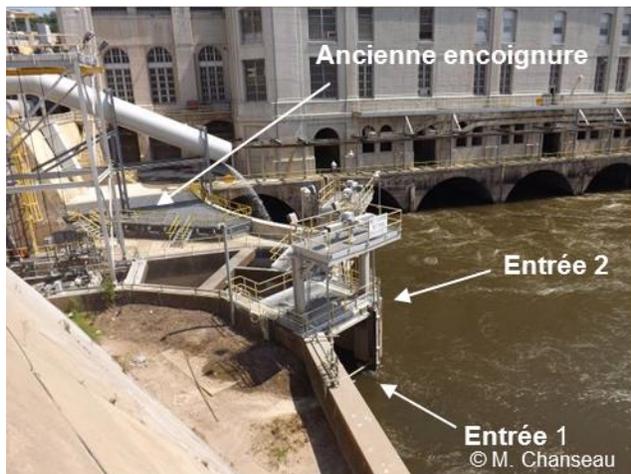
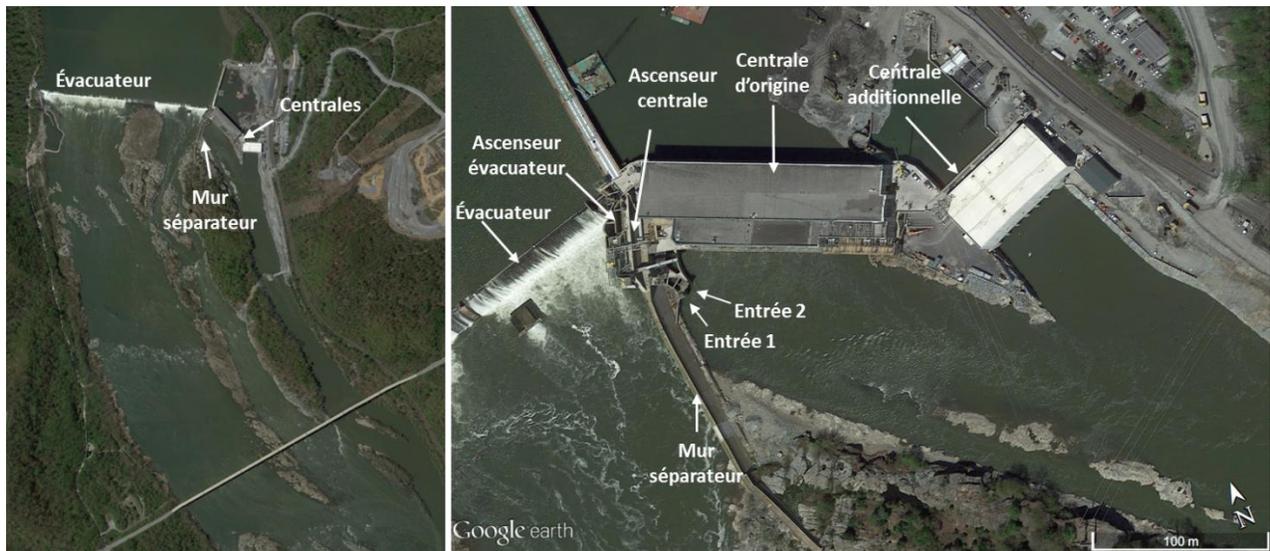
FRANCE 8 : VIRE – CLAIES DE VIRE : (de haut en bas) : vue aérienne de l'ouvrage de Claiés de Vire sur la Vire et de l'entrée de la passe à bassins.



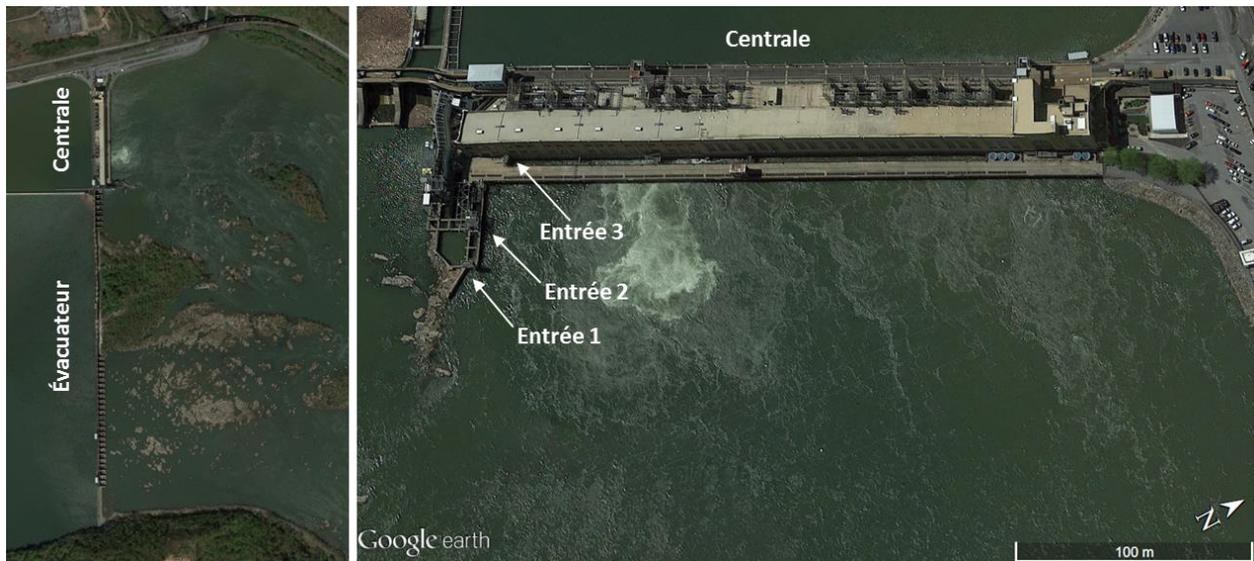
FRANCE 9 : ORNE – MAY SUR ORNE : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne du site de May sur Orne sur l'Orne ; vue de la partie amont du seuil ; vue de l'entrée de la passe ; vue de la passe à bassins.



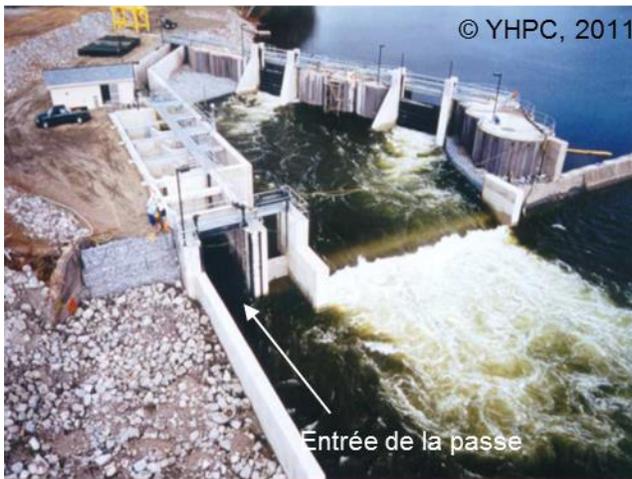
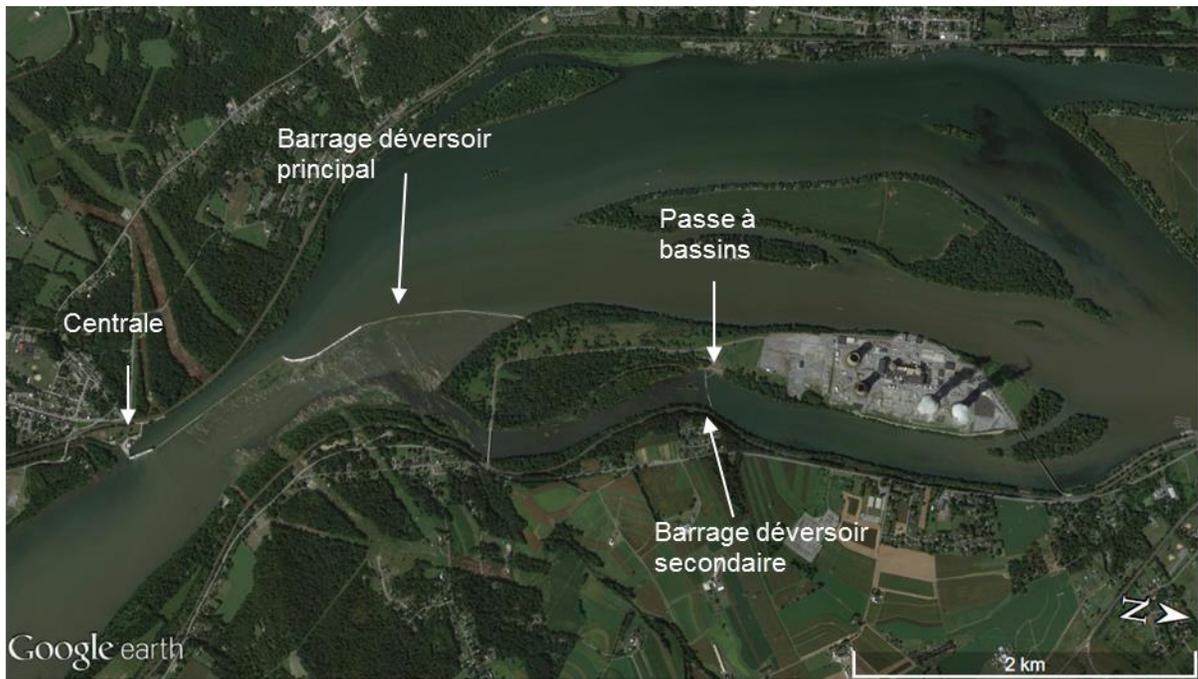
ÉTATS-UNIS 1 : SUSQUEHANNA – CONOWINGO : (de gauche à droite et de haut en bas) : vue aérienne de l'ouvrage de Conowingo sur la Susquehanna ; vue aval de l'usine ; vue de l'ascenseur Est ; vue des deux entrées de l'ascenseur Est ; vue de la zone d'injection du débit d'attrait de l'ascenseur Est.



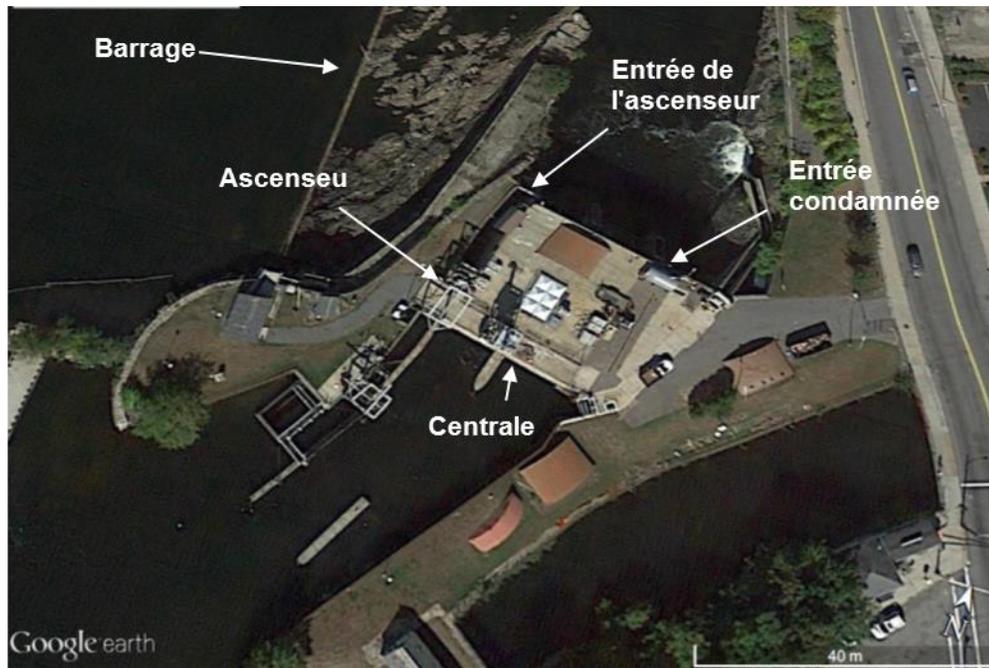
ÉTATS-UNIS 2 : SUSQUEHANNA – HOLTWOOD : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'ouvrage de Holtwood sur la Susquehanna ; vue aérienne de l'aménagement ; vue des deux usines et du barrage ; vue aval de l'usine 1 ; vue des deux entrées de l'ascenseur à l'usine ; vue de l'encoignure, comblée en 2010 (voir photo précédente) (Tryninewski, et al., 2012)



ÉTATS-UNIS 3 : SUSQUEHANNA – SAFE-HARBOR : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'ouvrage de Safe Harbor sur la Susquehanna et des trois entrées de l'ascenseur ; vue de l'usine depuis la rive gauche ; vue de l'usine depuis la rive droite ; vue des entrées 1 et 2 (abandonnée) ; vue de l'entrée 3.



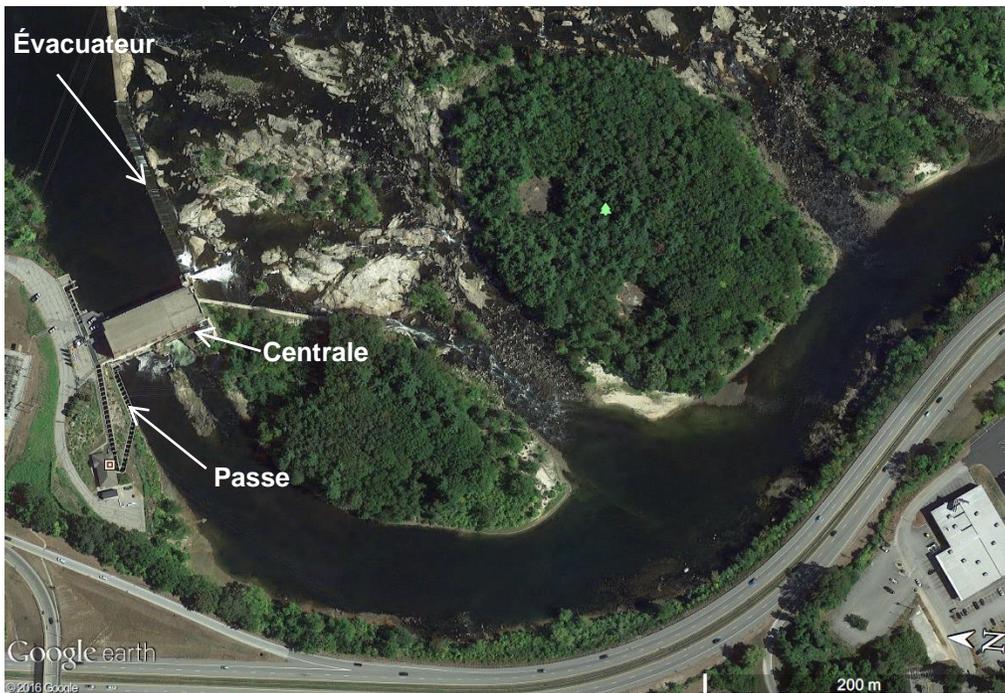
ÉTATS-UNIS 4 : SUSQUEHANNA – YORK-HAVEN : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'ouvrage de York Haven sur la Susquehanna ; vue aérienne de la passe à poissons ; vue de l'entrée de la passe et du débit d'attrait ; vue de la partie aval de la passe (fentes) ; vue de la partie amont de la passe (chicanes).



ÉTATS-UNIS 5 : MERRIMACK – LAWRENCE : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'ouvrage de Lawrence sur la Merrimack ; cours d'eau en aval de l'ouvrage ; vue aval de l'usine et des deux entrées ; vue de l'entrée de l'ascenseur ; vue du système anti-retour de l'ascenseur.



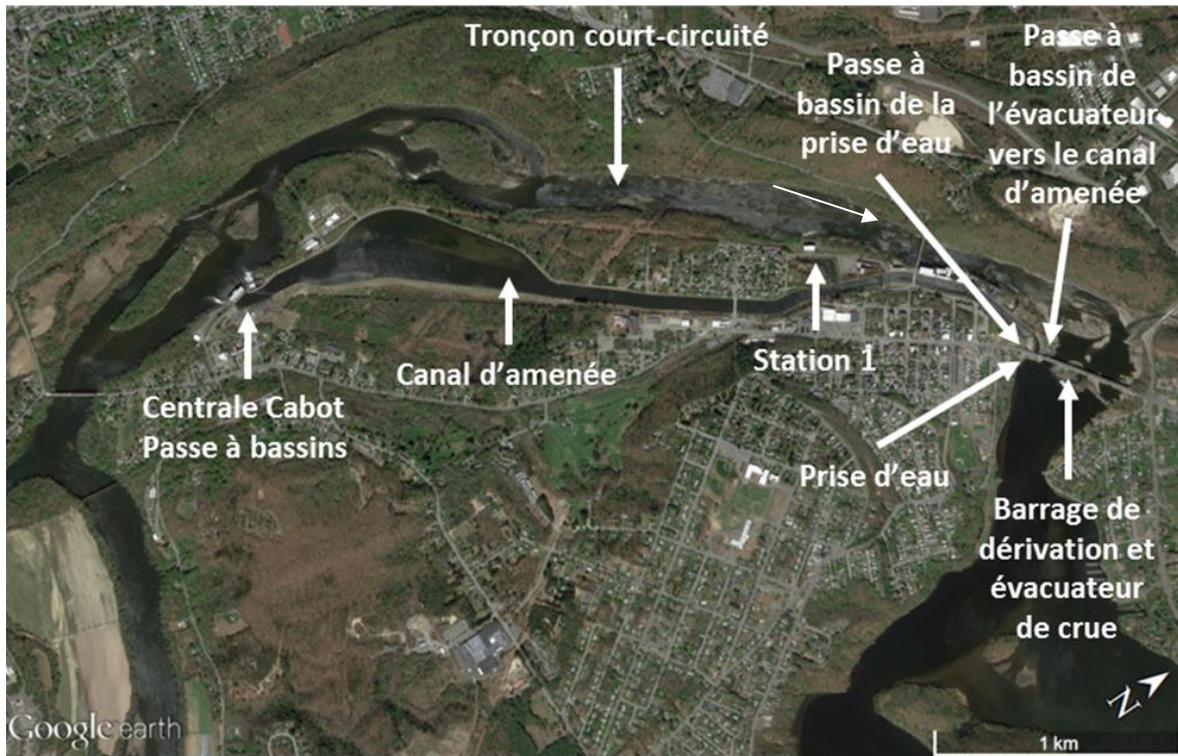
ÉTATS-UNIS 6 : MERRIMACK – LOWELL : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'ouvrage de Lowell sur la Merrimack ; cours d'eau en aval de l'ouvrage ; vue aval de l'usine et de l'entrée piscicole en fonctionnement ; vue de l'entrée piscicole et du déflecteur mis en place ; vue du système anti-retour.



ÉTATS-UNIS 7 : MERRIMACK – AMOSKEAG : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'aménagement d'Amoskeag sur la Merrimack; vue du canal de fuite et de l'entrée de la passe; vue du canal d'amenée et de la sortie de la passe.



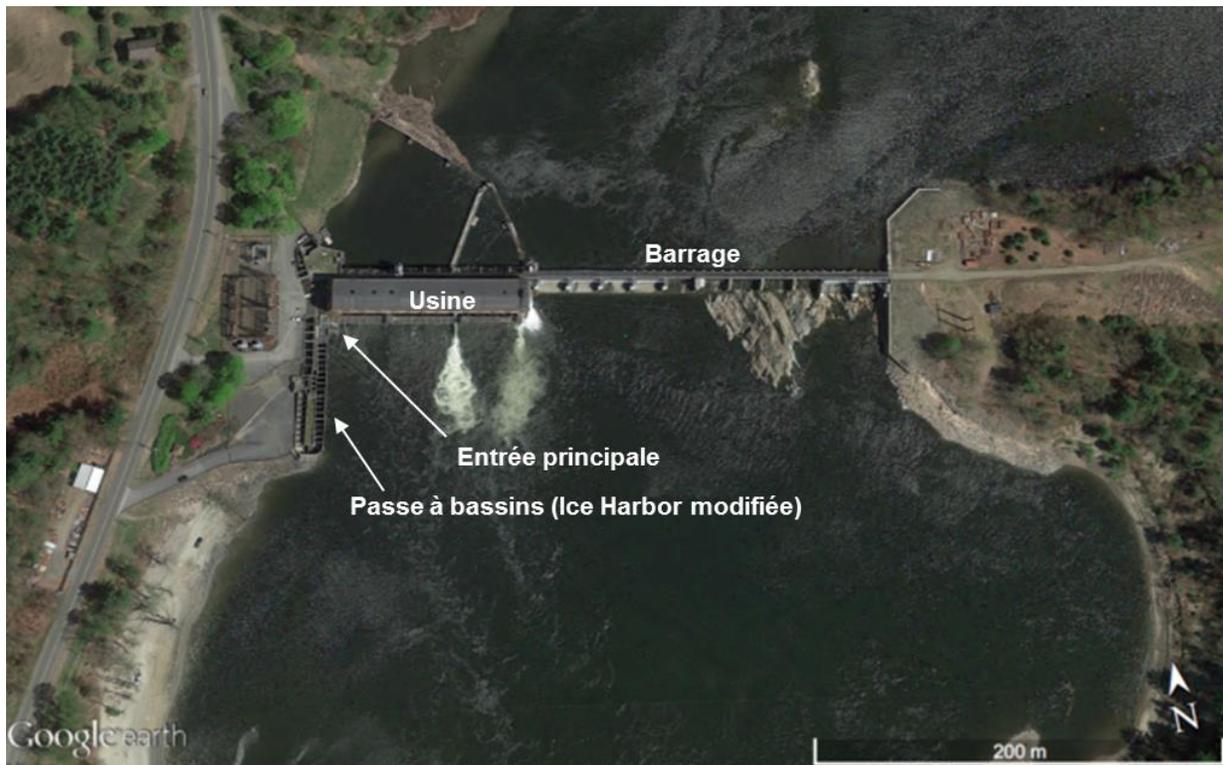
ÉTATS-UNIS 8 : CONNECTICUT – HOLYOKE : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'ouvrage de Holyoke sur la rivière Connecticut ; vue aval de l'usine ; vue des deux entrées de l'ascenseur à l'usine et de la galerie collectrice ; vue du système anti-retour de l'ascenseur à l'usine ; vue de l'entrée de l'ascenseur au barrage.



ÉTATS-UNIS 9 : CONNECTICUT – TURNERS-FALLS : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'ouvrage de Turners Falls sur la rivière Connecticut ; vue aérienne de la centrale Cabot ; vue de la passe à bassins de la centrale Cabot ; vue d'une chute entre deux bassins de la passe de la Centrale Cabot ; vue aval de la centrale Cabot et des différentes entrées (condamnées) reliées à une galerie collectrice.



ÉTATS-UNIS 9 : CONNECTICUT – TURNERS-FALLS (suite) : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de Gate House et du barrage; vue de la passe à bassins (fentes) de Gate House ; vue depuis l'aval de Gate House et des deux entrées ; vue depuis l'amont des deux entrées de la passe de Gate House ; vue de la passe à bassins (Ice Harbor) du barrage.



ÉTATS-UNIS 10 : CONNECTICUT – VERNON : (de haut en bas et de gauche à droite) : vue aérienne de l'ouvrage de Vernon sur la rivière Connecticut ; vue aval de l'usine ; vue de l'entrée de la passe ; vue des entrées secondaires condamnées ; vue de la passe à bassins (Ice Harbor).