



VOILET POISSONS MIGRATEURS 2015-2021

Suivi de la dévalaison d'anguilles argentées en 2018-2019 (septième année) sur la Vilaine à l'aide d'un DIDSON.



Anguille jaune
(© G. Germis, BGM)



Saumon mâle (© G. Germis, BGM)



Grande alose (© FD56)



Lamproie marine
(© F. Guérineau, FD35)



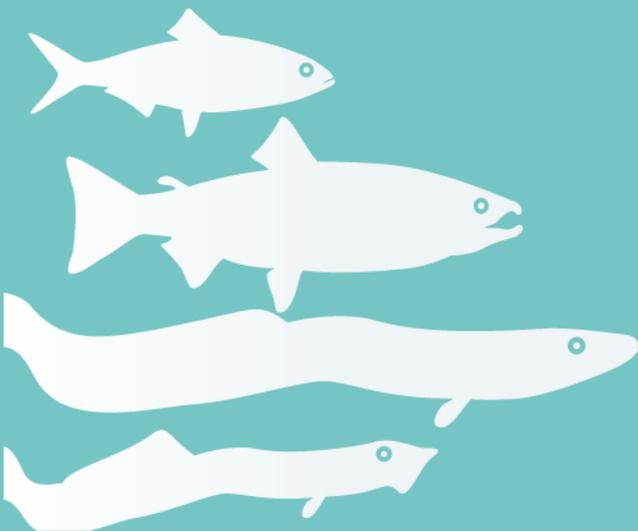
Truite de mer (© A. Langlois, Syndicat Horn)



Date d'édition :

Mai 2020

Réalisé avec le concours
de :



Soutiennent les actions du volet "poissons migrateurs" :



Cédric Briand
Brice Sauvaget
Gérard Eriau

Suivi de la dévalaison d'anguilles argentées
en 2018–2019 (7ème année)
sur la Vilaine à l'aide d'un DIDSON.

Cédric Briand, Brice Sauvaget, Gérard Eriau

20 mai 2020

Résumé

Les dévalaisons d'anguilles argentées ont été suivies pour la septième année consécutive à l'aide d'un sonar multifaisceaux (DIDSON) placé sur un rail porteur au niveau du quatrième pertuis de vannes du barrage d'Arzal à la limite de l'estuaire de la Vilaine. Le concentrateur de la chambre d'acquisition qui sert à focaliser le faisceau s'est tordu à la fin du mois de janvier de la de saison 2017-2018, et la détection diminue fortement à partir de 9m. Ce problème de "myopie" a été réparé le 13 décembre. Il est en partie compensé par des hypothèses de diminution de l'efficacité de détection et la non prise en compte des détections au-delà de 11 m dans les extrapolations. Un nombre total de 1736 anguilles argentées a été compté lors des dépouillements. L'efficacité de la détection a été calculée en fonction de la taille des anguilles, de la position du DIDSON et de la distance au DIDSON. Pour extrapoler les effectifs migrants à l'ensemble de l'ouvrage, le pourcentage de surface de la vanne suivi par le sonar, et le ratio des débits de la vanne 4 aux autres vannes ont été utilisés. Les effectifs suivis pour les configurations correctes, c'est à dire quand le DIDSON est bien positionné par rapport aux écoulements, en surface et au fond sur la vanne (N=1 675), sont extrapolés à l'ensemble des vannes (N=52 486). Lorsque le DIDSON est mal placé, les effectifs sont estimés à partir des densités du jour même (N=11 170). L'estimation quantitative de la dévalaison sur la Vilaine, sur la période de suivi s'établit à (N=64 578) soit 35.8 tonnes. Cette valeur est en diminution lorsqu'on la compare aux dévalaisons des années précédentes (130 000, 119 600, 114 200, 69 500 (Suivi partiel), 114 200, 81 336 et 70 099) de 2012–2013 à 2017–2018.

Abstract

The downstream run of silver eels has been monitored for the seventh year with a multi-beam sonar (DIDSON) positioned on a guidance rail at the fourth gate of the Arzal dam at the head of the Vilaine estuary. The 2017-2018 season is impacted by a technical problem occurring at the end of January. The concentrator of the acquisition chamber acting as a focus to the beam has been twisted, and the detection diminished strongly from 9m. This problem has been repaired from 13 December. It is partly offset by assumptions of decreasing detection efficiency and by not taking into account detections beyond 11 m in extrapolations. The detection efficiency has been calculated according to the position, the distance to the sonar, and the eels sizes. Using this efficiency, the percentage of the surface of the gate monitored by the sonar, and the ratio of the flow of the fourth gate to the other gates, the number of eels counted when the monitoring of the sonar was judged accurate (1 675) have been extrapolated first on the whole gate than to the whole dam to obtain an estimate of the run (N=52 486). From these values, a model was built to estimate the run of eels when the sonar was badly positioned or when it failed to record properly (N=11 170). The annual run of silver eel on the Vilaine is estimated at (N=64 578) corresponding to an estimated weight of 36 tons. This value is decreasing when it is compared to the downstream migration from previous years (130 000, 119 600, 114 200, 69 500 (Partial monitoring), 114 200) from 2012–2013 to 2017–2018.

anguille argentée migration dévalaison DIDSON Vilaine

Keywords : *silver eel downstream migration DIDSON Vilaine*

Sommaire :

1	Matériel et méthodes	3
1.1	Description du site	3
1.2	Description du matériel	4
1.3	Automatisation de la position verticale du DIDSON	4
1.4	Suivi des migrations	4
1.5	Mesure des conditions environnementales	7
1.6	Calcul des débits	7
1.7	Dépouillement des fichiers	8
1.8	Traitements	9
1.8.1	Efficacité de la détection	10
1.8.2	Migration sur l'ensemble de la vanne	10
1.8.3	Migration sur l'ensemble du barrage	11
1.8.4	Migration jour/nuit	11
1.8.5	Modélisation de la migration	11
1.8.6	Calcul des biomasses	11
2	Résultats	12
2.1	Suivi	12
2.1.1	Fonctionnement du barrage	12
2.1.2	Dépouillement des fichiers	12
2.1.3	Problèmes dans le suivi	13
2.1.4	Positionnement du DIDSON	15
2.1.5	Qualité des images	15
2.2	Taille des anguilles et efficacité	16
2.2.1	Calcul de l'efficacité en phase myope	18
2.2.2	Calcul de l'efficacité en fin de saison	19
2.3	Migration	19
2.3.1	Migration en fonction du cycle nycthémeral	19
2.3.2	Comportement de migration	21
2.3.3	Biomasses et sexe ratios	22
2.3.4	Estimation des effectifs migrants	22
2.3.5	Prédiction pour les données manquantes	22
3	Discussion	23
3.1	Migration	23
3.2	Biais et précision	24
3.2.1	Confusion avec d'autres espèces	24
3.2.2	Taille des anguilles	25
3.2.3	Efficacité moyenne	25
3.3	Synthèse inter-annuelle	25
3.4	Comparaison à la production estimée par le modèle EDA	25
3.5	Remerciements	26
3.6	Détails concernant le positionnement du DIDSON et le comptage des anguilles	28
4	Notations	32

Introduction

L'objectif à long terme fixé par le plan de restauration de l'anguille est la restauration de la biomasse d'anguilles argentées à 40 % du niveau sans impact anthropique. Pour évaluer l'atteinte des objectifs de ce plan par les états membres, la commission européenne demande, dans son règlement, de quantifier la biomasse d'anguilles argentées¹. Elle demande aussi de la comparer, soit à une valeur historique de biomasse d'anguilles produite par les bassins, avant la chute des arrivées de civelles dans les années 1970, soit à une valeur théorique de production basée sur les productivités en anguilles des différents milieux aquatiques. Enfin, les états membres doivent montrer que les mesures de gestion mises en place pour restaurer le stock d'anguilles sont suffisantes. L'estimation de la biomasse d'anguilles argentées produite par les bassins versants français est basée, pour la mise en place du règlement anguille (2009) sur le modèle EDA (Briand et al., 2015a, Jouanin et al., 2012). Ce dernier extrapole une estimation de l'abondance moyenne d'anguilles à partir des données de pêches électriques d'anguilles jaunes sur l'ensemble du territoire français. Pour le rapportage les données de ce modèle sont complétées par un suivi sur des bassins ateliers, les rivières index (Briand et al., 2017). La Vilaine est l'un des fleuves intégré à ce réseau. Un sonar multifaisceau DIDSON a été placé en 2012 sur une poutre HEB au droit des vannes du barrage. Ce dernier renvoie des images, interprétable comme des vidéos, sur un faisceau d'une taille réduite (25m²). La lecture des échos radar a montré qu'il était possible de distinguer les anguilles des autres poissons, dans des conditions de débit qui interdisent en pratique d'utiliser des méthodes plus conventionnelles. La gestion particulière du barrage d'Arzal qui évacue les crues au niveau de la mer fait que les conditions de vitesses lors des crues ne sont pas extrêmes et que la lecture des fichiers reste possible. En période de débit réduit, le DIDSON placé en surface près du volet peut observer une large portion de la section de migration, mais lorsque la vanne s'ouvre, et que l'écoulement se fait sur une section plus large, voire sur d'autres portes, la section relative observée par

1. Les anguilles argentées sont les individus encore immatures qui débutent leur migration vers la zone de reproduction dans la mer des Sargasses depuis les eaux continentales. Elles descendent à partir de l'été principalement sous l'effet des augmentations de débit.

le DIDSON devient plus réduite. La distinction des anguilles dévalantes dépend également de leur taille et de leur distance au DIDSON. Depuis 2012, une méthode a été développée pour permettre d'extrapoler les comptages d'anguilles observées au DIDSON, à l'ensemble du fleuve. Le rapport qui suit fait la synthèse du suivi 2018–2019 en appliquant la méthode d'extrapolation, et en comparant les résultats aux six années précédentes (saisons 2012–2013, 2013–2014, 2014–2015, 2015–2016, 2016–2017 et 2018–2019) (Briand et al., 2018a,b, 2014, 2015b, 2016, 2019).]

1 Matériel et méthodes

1.1 Description du site

Le barrage d'Arzal-Camoël est construit à 10 kilomètres de l'embouchure de la Vilaine. Il a été édifié entre 1965 et 1970 et est constitué d'un pertuis central de 160 mètres comprenant 5 vannes, d'une écluse et d'une digue en terre de 360 mètres. Ce barrage constitue une rupture nette entre le milieu estuarien et le plan d'eau douce artificiellement créé à l'amont (Figure 1).

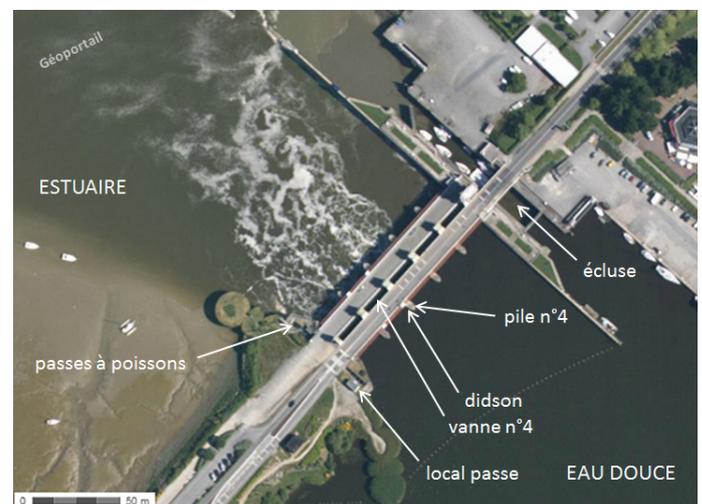


FIGURE 1 – Vue aérienne du barrage d'Arzal, montrant en rive droite l'écluse et le pertuis des vannes.

Le sonar multifaisceaux est positionné 15 m en amont de la vanne 4 (Figure 2), dans l'échancrure de batardage de la vanne. La structure porteuse de l'appareil est une poutre HEB 240 de 12m, sa fixation permet de maintenir le DIDSON à l'abri des corps dérivants (Figure 3).



FIGURE 2 – Vue montrant un écoulement sur le volet 4 à partir de l’aval du barrage.

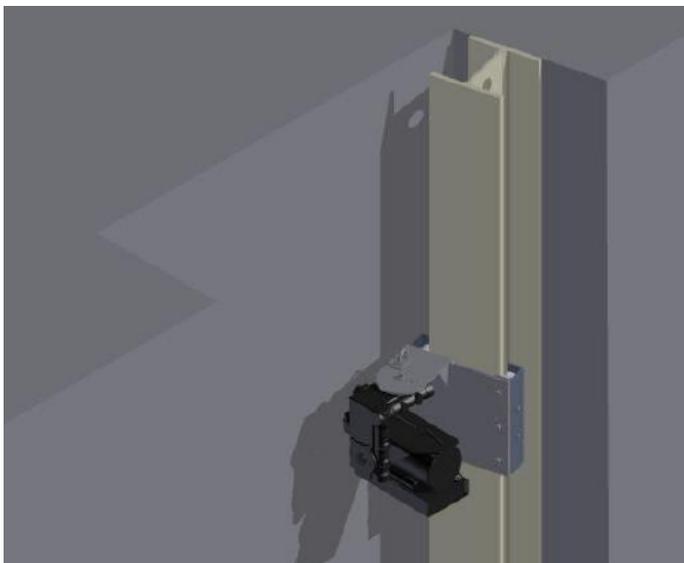


FIGURE 3 – Positionnement du DIDSON dans l’échancrure de batardage de la vanne. Le DIDSON est placé à l’abris des corps dérivants.

1.2 Description du matériel

Le système d’enregistrement est composé d’un sonar multifaisceaux (DIDSON de Soundmetrics) équipé par un rotateur (Soundmetrics, X2) permettant de guider le DIDSON dans un positionnement vertical et latéral (Figure 4). Le chariot du DIDSON permet de le positionner à différentes profondeurs dans la colonne d’eau (Figure 5). Les images sont traitées à l’aide du logiciel de dépouillement DIDSON V5.25.35 de la société Soundmetrics.



FIGURE 4 – Le DIDSON en 2017.



FIGURE 5 – Chariot du DIDSON.

1.3 Automatisation de la position verticale du DIDSON

La position verticale du DIDSON est automatisée par un treuil. Le treuil est relié à l’automate du barrage par une liaison ethernet et le pilotage des positionnements du DIDSON se fait par une interface graphique (Figures 8, 6). Un système de gestion des câbles permet le déplacement vertical du DIDSON à l’aide un chariot (Figure 7).

1.4 Suivi des migrations

Lors de l’hiver 2012–2013, le DIDSON avait été placé dans trois types de positions. En position haute lorsque les écoulements étaient en surface



FIGURE 6 – A Armoire électrique de commande de l’automate, déportée sur la pile, B treuil avec codeur incrémental, C chariot de levage et de positionnement du DIDSON (pour la sécurité).

(Figure 9). Lorsque l’écoulement s’effectuait par le fond, en période de plus fort débit, il a été placé en position basse, à 80 cm du fond. Il a alors été programmé afin d’échantillonner alternativement une zone où une partie de l’écho se reflétait sur le fond, et une zone en pleine eau.

En 2013–2014, la stratégie d’échantillonnage a été revue : l’analyse des données 2012–2013 montre que l’écho sur le fond a pu générer une perte d’efficacité du DIDSON dans la zone d’écho. L’enregistrement près du fond a continué à être effectué à -6.92 m (80 cm du fond) mais les angles du DIDSON ont été réglés à 4 et 6 ° pour que la zone d’acquisition reste en pleine eau. En surface, l’acquisition a été faite à angle constant afin que la zone d’acquisition du DIDSON reste sous la surface, pour éviter que les reflets à la surface de l’eau ne gênent la lecture (Figure 24). Des essais ont également été effectués en surface, et au fond, en alternant les directions du DIDSON entre un angle élevé et une position droite, pour tenter de collecter des informations sur la position verticale des anguilles en fonction des ouvertures de la vanne.

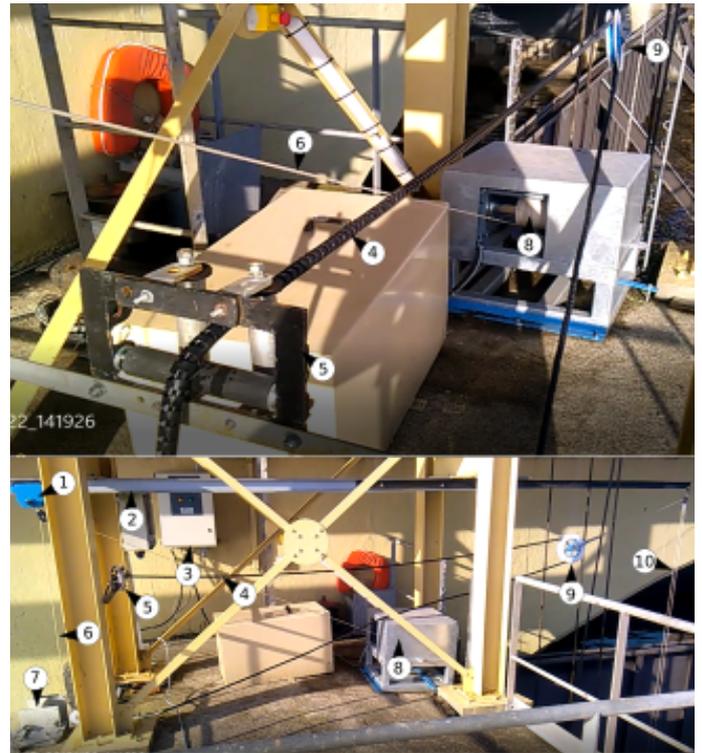


FIGURE 7 – Automatisation de la position verticale du DIDSON. 1 chariot sur poutre heb, 2 rail, 3 coffret électrique comprenant les éléments de contrôle de l’automate, 4 câble du DIDSON (alimentation et signal) renforcé par une gaine, 5 guide câble, 6 câble de traction du DIDSON, 7 poutre HEB du chariot de DIDSON (plongeant en amont de la vanne), 8 treuil et chaise de protection, 9 poulie, 10 contre-poids assurant la tension du câble.



FIGURE 8 – Ecrans de contrôle et de programmation de la position du DIDSON

En 2014–2015, la gestion du positionnement du DIDSON a été fortement dépendante de la gestion de crise du barrage du fait des avaries répétées des vannes. Le rotateur a été cassé lors de la principale crue, alors que la majeure partie du débit a été évacuée sur la vanne 4.

En 2015–2016, le rotateur n’a été remplacé qu’au 4 janvier. Le DIDSON a fonctionné avec un angle constant pour le début de la saison. Il a été placé alternativement en surface et au fond en fonction des débits du barrage. Du 4 janvier au 26 avril, la saison a été constituée d’une succession de pics de crue d’ampleur moyenne, pendant lequel le DIDSON a enregistré au fond.

En 2016–2017, le DIDSON a été bien positionné pour enregistrer les deux premiers pics de crue, à partir du 13/02, le signal a été détérioré par une attaque de corrosion. Jusqu’au 17/03, malgré plusieurs essais de remise en fonctionnement, il n’y a pas vraiment de suivi. En fin de saison, le DIDSON a été placé en volets puis en vannes mais les effectifs observés sont restés faibles.

En 2017–2018, un problème de déformation de la lentille d’acquisition a dégradé la qualité des images à partir de fin janvier.

Enfin, en 2018–2019 l’essentiel de la saison est couvert par le mode "suivi vanne volets" qui permet de positionner correctement le DIDSON en cours de nuit lorsque la gestion du barrage alterne entre vannes en volets. La saison peut être résumée comme suit :

(Figure 44).

(A) Jusqu’au 13 décembre, date de réparation de la fente du concentrateur, la vision du didson reste perturbée, la qualité des images dégradée, et l’efficacité limitée. Le DIDSON a été positionné soit en volets $h=0$ m, angle 0° , soit au fond $h=-5.5$ m, angle 0° (Figures 45). Un pic de crue (débits $> 100 m^3.s^{-1}$) à $121 m^3.s^{-1}$ est intervenu entre le 03 et le 05 décembre avec des débits supérieurs à $50 m^3.s^{-1}$ à partir du 29/11. Il est probable que de nombreuses anguilles aient pu être manquées pendant cette période. La baisse d’efficacité est compensée par une hypothèse de diminution de l’efficacité pour la zone la plus proche du DIDSON. Contrairement à l’année précédente, les anguilles ont pu être détectées dans les deux zones les plus distantes de DIDSON ($\delta=(11,13m[$ et $\delta=(13,15m[$).

(B) La deuxième période s’étend jusqu’au 24 janvier et correspond à une crue de $222 m^3.s^{-1}$ le 23/12 puis des débits compris entre 40 et $50 m^3.s^{-1}$

Le DIDSON alterne tous les jours entre volet et vanne. Deux positionnements ont été utilisés dont un seulement sur une semaine car il provoquait des échos au fond. Le principal positionnement, $h=-5.5$ m, angle 0° a été utilisé lors de deux périodes successives entre le 14/12 au 11/01 (Figure 46). L’autre positionnement $h=-5.5$ m avec un angle -7° a été utilisé du 01 au 8/01 (Figure 47a). En surface, différentes positions et angles sont alternées entre $h=0$ m et $h=1$ m mais le nombre de détection est toujours plus faible (Figures 46a, 48a, 48b).

(C) La troisième période après le 24 janvier correspond à une reprise des débits à $165 m^3.s^{-1}$ le premier février puis une augmentation jusqu’au principal pic de crue avec des débits montant d’abord, puis à $392 m^3.s^{-1}$ le 10 février (Figure 49, 50). De nouveau le DIDSON alterne entre fond et surface à l’aide de l’automate, Entre le 06/02 et le 08/02 il n’y a pas d’acquisition du fait d’un problème d’écriture sur le disque.

(D) A partir de mars, le DIDSON est remonté en surface (Figure 51).

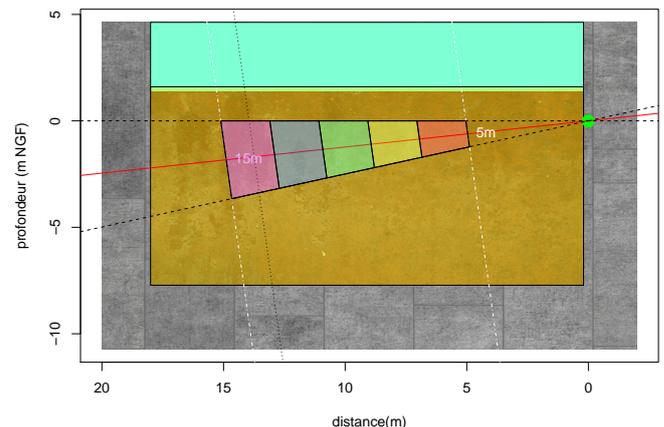


FIGURE 9 – Schéma montrant la position du DIDSON et la fenêtre d’échantillonnage couverte par l’appareil lorsque celui-ci est placé 1 m sous la surface (-7°) pour détecter les anguilles migrant sur les volets. Les polygones de couleur représentent les différentes sections d’échantillonnage en fonction de la distance.

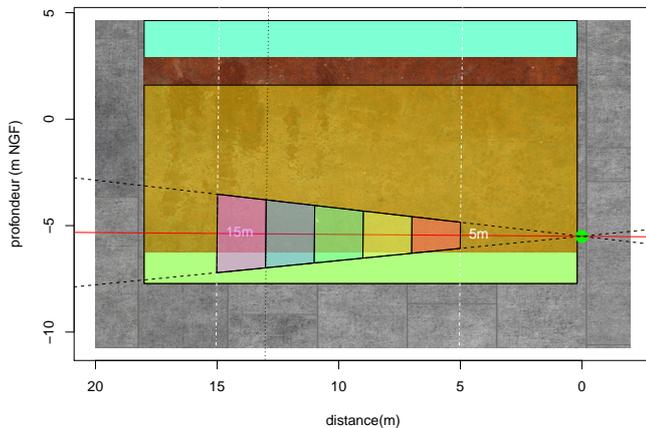


FIGURE 10 – Fond 0° 5-15m, DIDSON placé à 5.5 m de profondeur lorsqu'il alterne entre des positions au fond et en surface à l'aide du positionnement géré par l'automate. Le DIDSON échantillonne (14.8% de la fenêtre de passage supposée).

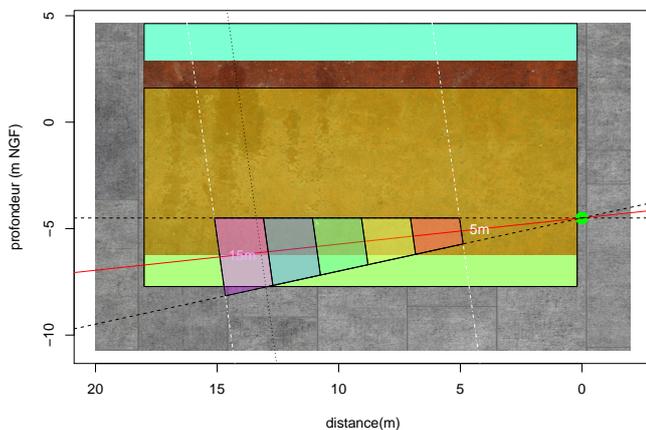


FIGURE 11 – Fond -7° 5-15m, Didson placé à 4.5 m de profondeur avec un angle de -7° . Par rapport à la position en Figure 10 le DIDSON est remonté. L'angle de -7° permet d'éviter les échos sur la surface lorsque le DIDSON est remonté en position haute par l'automate. Le DIDSON échantillonne (14.6% de la fenêtre de passage supposée).

1.5 Mesure des conditions environnementales

Les paramètres décrivant le fonctionnement du barrage sont enregistrés toutes les dix minutes dans la base de données SIVA². Il s'agit :

1. Des niveaux d'ouverture des 5 vannes.
2. De la position des volets, 5 clapets flottants par lesquels sont évacués les débits du barrage lorsque le débit est suffisamment faible (entre 10 et $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);
3. des débits transitant par la passe à poissons.
4. Des débits des siphons³.
5. Du débit de la Vilaine, calculé au niveau du pont de Cran, 30 kilomètres en amont du barrage d'Arzal.
6. Des températures d'eau enregistrées au niveau de sondes en amont et en aval du barrage.
7. Des niveaux d'eau enregistrés en amont et en aval du barrage sur plusieurs sondes.

Les données ont été collectées à partir de la base de données et compilées par séquences de 30 minutes dans un format compatible avec celui du DIDSON.

D'autres données, au format journalier, comme les horaires de levers et couchers du soleil, ont été ajoutées à cette base. Les durées de pénombre civile correspondant à une position du soleil entre 0° et -6° ont été estimées à partir d'une durée de 24 minutes avant le lever et après le coucher du soleil.

1.6 Calcul des débits

Les débits ont été re-calculés au droit du barrage d'Arzal car les formules de débit utilisées étaient fausses, particulièrement en période de forts débits. Les formules ont été recalculées à partir des débits de la station du pont de Cran 30 km en amont du barrage. Les nouveaux débits sont donnés pour les volets et pour les vannes avec la prise en compte de plusieurs formules en fonction des conditions d'écoulement (orifice dénoyé, orifice noyé, écoulement libre) (Briand et Woimant, 2015).

2. SIVA= Système d'Information de la Vilaine et de ses Affluents

3. Les siphons sont des tuyaux dont le fonctionnement gravitaire permet d'évacuer les lentilles d'eau salée s'accumulant en profondeur en amont du barrage, du fait du fonctionnement estival de l'écluse. Les siphons débouchent près de l'entrée de la passe en rive gauche de l'ouvrage.

Cet ajustement avec les nouvelles formules ne modifie pas substantiellement les débits calculés, car les périodes pour lesquelles les écoulements sont libres ne sont pas nombreuses pendant la saison hivernale 2018–2019 (Figure 12).

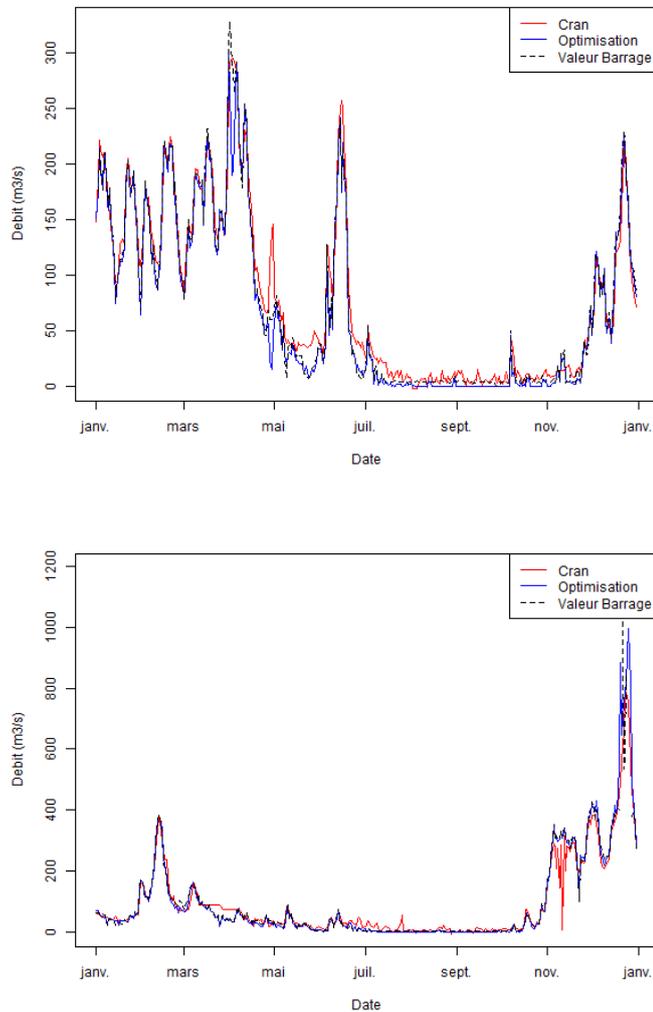


FIGURE 12 – Débits recalculés en 2018 (haut) et 2019 (bas). Comparaison des débits mesurés au niveau de la station de Rieux (Pont de Cran - station hydrométrique), des débits calculés par l’automate du barrage d’Arzal et des débits recalculés par la méthode de Briand et Woimant (2015). La saison de suivi s’étend de septembre 2018 à mai 2019, attention aux échelles sur les deux années.

L’analyse des dérives des codeurs du volet 3 conduit à corriger substantiellement les périodes avec et sans écoulement sur les volets en début de saison. En pratique, les ouvertures de septembre ne sont que des ouvertures diurnes et n’ont pas d’effet sur les suivis au DIDSON qui se concentrent sur les périodes

nocturnes (Figure 13).

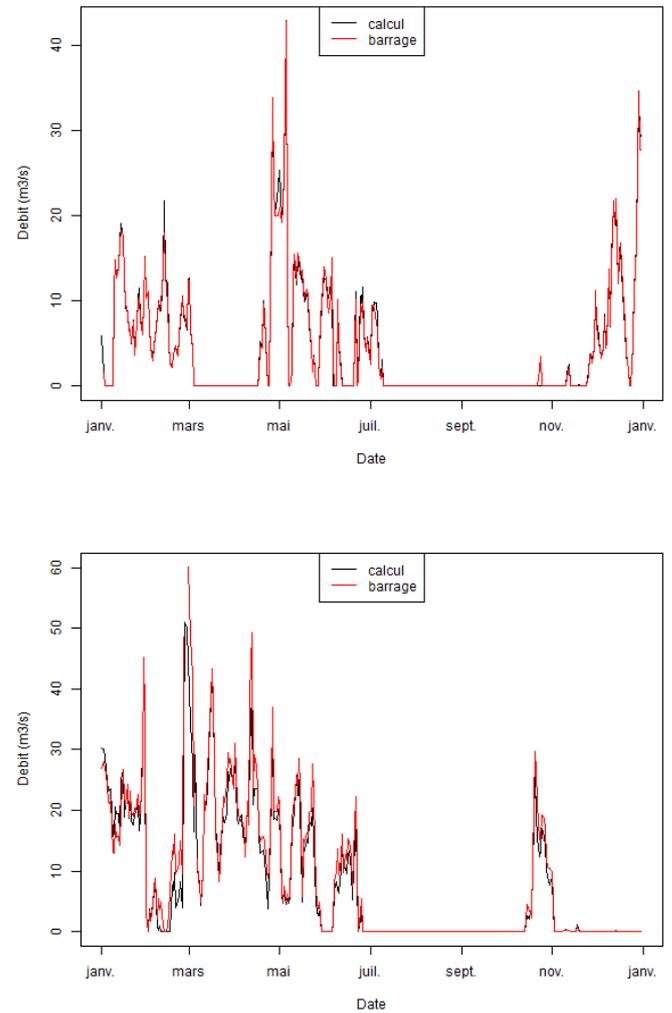


FIGURE 13 – Correction des débits des volets en 2018 (haut) et 2019 (bas), comparaison des valeurs produites par l’automate du barrage et des valeurs obtenues après correction de la dérive des codeurs. Les formules de débits des volets ont été recalées mais donnent à peu de choses près les mêmes débits avec des formules de débit différentes (Briand et Woimant, 2015).

Les débits ont été recalculés pour chacun des pertuis de vanne (Figure 14).

1.7 Dépouillement des fichiers

Les fichiers sont recueillis au niveau du local de la passe à intervalles réguliers et rapatriés au siège de l’EPTB Vilaine. Ils sont ensuite traités par le logiciel pour réduire le temps de dépouillement. Le

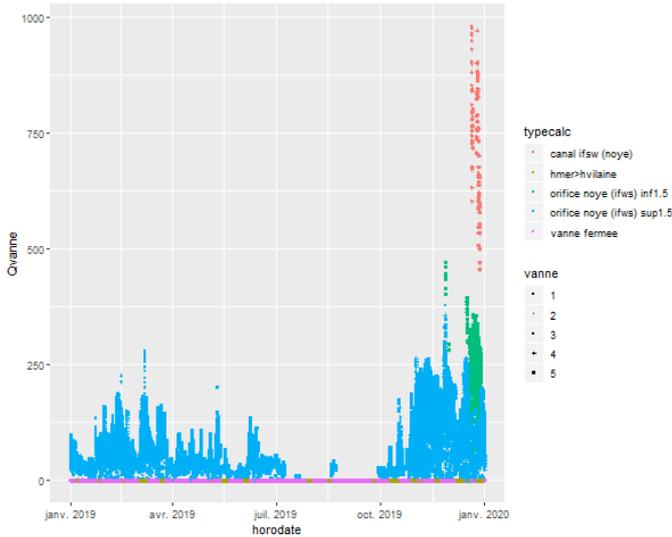


FIGURE 14 – Débits de chacun des pertuis de vanne pour l’hiver 2018–2019 en fonction des différents types d’écoulement calculés sur chaque vanne Briand et Woimant (2015)).

traitement (CSOT) retire les éléments stables de l’image (échos constants) et ne retient que des poissons ou objets pouvant correspondre à des anguilles. Ce processus permet de réduire la taille des fichiers et de limiter le temps de dépouillement, mais il dépend aussi des conditions. Le passage d’un banc de mulets, par exemple, pourra conduire à garder l’ensemble du fichier. Les seuils de traitement appliqués sont identiques aux années précédentes, 2.8 dB en volet et 2.1 dB en vanne. A plusieurs reprises des comparaisons ont été menées aux fichiers complets pour vérifier que l’application du CSOT ne conduisait pas à écarter des données. Les fichiers qui contenaient des anguilles douteuses (notées 1 sur une échelle de 1 à 5) ont été relus par les deux lecteurs pour validation. La présence de mulets en dévalaison ou de nombreux alevins est notée sur une échelle de 0 à 5, depuis le niveau zéro (pas d’alevins ou de mulets) à 5 (gêne maximale).

Trois type de nage sont notés :

- *Running* l’anguille dévale normalement,
- *Backsliding* l’anguille dévale avec la tête orientée vers l’amont,
- *Hanging* l’anguille a un comportement de nage à contre courant et au final il est difficile de savoir si elle est passée ou pas, ce type de comportement se produit en général à l’ouverture des vannes.

Par rapport à la lecture du DIDSON, les opéra-

teurs renseignent également l’entrée et la sortie des anguilles du champ. La zone d’écho du sonar se présente comme un cône (Figure 15). Cette image rassemble en deux dimensions les échos enregistrés à plusieurs hauteurs, il n’est donc pas possible de connaître le positionnement vertical de l’anguille dans le cône du faisceau (Figure 9). Plusieurs types d’enregistrement sont donc répertoriés :

- \leftarrow l’anguille traverse l’ensemble du champ horizontal prospecté par le DIDSON (elle traverse le faisceau de la gauche vers la droite (Figure 15)),
- *In* l’anguille entre dans le champ, soit par-dessus, soit par dessous, soit latéralement (dans ce cas elle entre généralement en début de champ de détection, c’est à dire qu’elle était entre la pile et la zone de prospection); pour l’observateur elle apparaît donc en cours de trajectoire au milieu du champ.
- *Out* l’anguille sort du champ.
- *InOut* l’anguille entre et ressort.

1.8 Traitements

Les données sont récupérées depuis la base de données PostgreSQL à l’aide d’outils RODBC et sqldf (Conway et al., 2013, Grothendieck, 2012).

Les suivis concernent quatre classes de tailles d’anguilles (τ formule 1) dont les probabilités de détection par le DIDSON ne sont pas équivalentes en fonction des distances (δ , formule 2, Figures 9 10). La fenêtre de détection est découpée en cinq valeurs δ (formule 2). Les résultats ont été regroupés en fonction de deux positions du DIDSON (k , formule 3). Les suivis sont ramenés à la durée d’un fichier de suivi, c’est à dire $t=30$ minutes.

$$\text{Tailles d'anguilles } (\tau) = \begin{cases} < 45\text{cm} \text{ mâles} \\ 45 - 60\text{cm} \text{ petites femelles} \\ 60 - 80\text{cm} \text{ grandes femelles} \\ > 80\text{cm} \text{ très grandes femelles} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Distance } (\delta) = \begin{cases} (5, 7\text{m}[\\ (7, 9\text{m}[\\ (9, 11\text{m}[\\ (11, 13\text{m}[\\ (13, 15\text{m}[\end{cases} \quad (2)$$

Après le 23 janvier du fait de l'absence de détections au-delà de 11 m.

$$\text{Position } (k) = \begin{cases} f_5 \text{ fond, 5-15m} \\ s \text{ surface, 5-15m} \\ n \text{ fond et surface, 5-15m, <13 décembre} \end{cases} \quad (3)$$

L'objectif des traitements est d'extrapoler le nombre d'anguilles observées au niveau du sonar $N_{4o}(t, \tau, \delta)$, à l'ensemble de la vanne 4, $N_4(t, \tau)$, puis à l'ensemble du fleuve Vilaine $N(t, \tau)$.

1.8.1 Efficacité de la détection

Le nombre observé par les opérateurs du DIDSON pour chaque classe de taille, correspond au nombre d'anguilles migrant multiplié par l'efficacité du DIDSON $E_k(t, \delta, \tau, t)$, calculée pour chaque classe de taille τ , chaque classe de distance δ et pour les différentes positions du DIDSON k (Formule 4).

$$N'_{o4}(t, \tau, \delta, k) = N_{o4}(t, \tau, \delta, k) \times E_k(t, \delta, \tau) \quad (4)$$

En pratique, le nombre de détections disponibles pour le DIDSON est trop faible pour permettre de tester une variation temporelle de l'efficacité du DIDSON et la somme des effectifs observés sur l'ensemble de la période sert de base au calcul.

$$N_{o4}(\tau, \delta, k) = \sum_t N_{o4}(t, \tau, \delta, k, t)$$

Si l'efficacité est de 100%, le nombre d'anguilles détectées devrait augmenter régulièrement avec la distance au DIDSON en proportion de l'augmentation de la surface couverte par le faisceau $S(k)$ (Figure 9). Cette augmentation est linéaire, sauf lorsque le faisceau heurte le fond, car alors une partie de la zone de détection est perdue. Pour chaque positionnement du DIDSON on a :

$$\begin{aligned} N_{o4}(\tau, \delta + 1, k) &= \\ N_{o4}(\tau, \delta, k) \times \frac{S(\delta + 1, k)}{S(\delta, k)} \end{aligned} \quad (5)$$

Les surfaces des polygones sont calculées par l'intersection de droites Peng et al. (2013) (Figures 9). D'une classe de taille à la suivante, les nombres observés devraient théoriquement augmenter en cohérence avec les rapports de surface. En effet, d'après 4 et 5, on a (formule 6) :

$$\begin{aligned} E(\delta + 1, \tau, k) &= \\ E(\delta, \tau, k) \times \frac{S(\delta + 1, k)}{S(\delta, k)} \times \frac{N'_{o4}(\tau, \delta, k)}{N'_{o4}(\tau, \delta + 1, k)} \end{aligned} \quad (6)$$

En prenant comme référence $E=1$ pour les détections les plus proches du DIDSON, on peut calculer l'efficacité en fonction de la distance de détection. De manière arbitraire, considérant que le nombre d'anguilles de bonne qualité avait été diminué de moitié lors des problèmes du concentrateur, les efficacités de référence sont diminuées de moitié. Ainsi $E=0.5$ après avant le 13 décembre. Ces données sont ensuite utilisées pour calculer les efficacités moyennes par un modèle linéaire, pour lequel b_0, b_1, \dots, b_5 sont les coefficients de la régression. Les interactions entre la distance et la position $\delta : k$ et entre la taille et la position $\tau : k$ sont testées. La prédiction du modèle peut conduire à des efficacités supérieures à 1, qui sont alors ramenées à 1 (formule 7).

$$\begin{aligned} E(\widehat{\delta}, \widehat{\tau}, k) &= \\ \min(1, b_0 + b_1\tau + b_2\delta + b_3k + b_4\delta : k + b_5\tau : k) \end{aligned} \quad (7)$$

L'efficacité pour chaque position du DIDSON k \bar{E}_k correspond à l'efficacité moyenne pondérée, calculée comme suit :

$$\bar{E}_k = \frac{\sum_{\tau\delta} N'_{o4}(\tau, \delta, k)}{\sum_{\tau\delta} N_{o4}(\tau, \delta, k)} \quad (8)$$

Le rotateur n'a pas été utilisé en 2018/2019. Les autres années, le calcul des effectifs à chaque pas de temps était finalement pondéré d'un facteur lié au temps d'enregistrement réduit par le fonctionnement du rotateur lorsqu'il se repositionnait. Les enregistrements de chaque heure H étaient alors sur les périodes $H : 00 : 00 \Rightarrow H : 29 : 00$ et $H : 30 : 00 \Rightarrow H : 59 : 00$. Sur les périodes correspondant à un échantillonnage en alternance, les effectifs étaient donc amputés d'un facteur $\rho(k)$. Pour l'ensemble de la saison, en l'absence de fonctionnement du rotateur, on a $\rho(k)=1$.

$$\begin{aligned} E(\bar{k}) &= E(\bar{\delta}, \bar{\tau}, k) \\ N'_{o4}(t, k) &= N_{o4}(t, k) \times E(\bar{k}) \times \rho(k) \end{aligned} \quad (9)$$

1.8.2 Migration sur l'ensemble de la vanne

Lors des écoulements par le fond, en vanne, l'analyse de la répartition verticale des anguilles a montré qu'il semblait y avoir une présence des anguilles sur l'ensemble de la colonne d'eau (Briand et al., 2015b). Compte tenu de cette observation, il a été nécessaire d'étendre la hauteur de migration qui

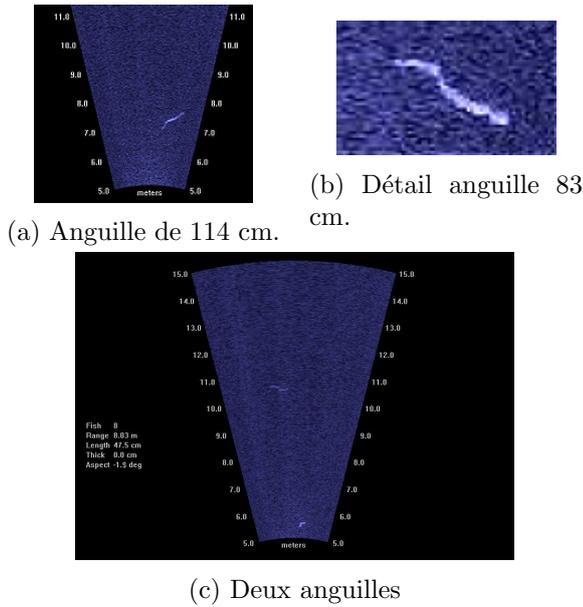


FIGURE 15 – Anguilles en dévalaison filmées par le DIDSON.

lors de la première année n’avait été considérée que comme étant de deux fois la hauteur d’ouverture de la vanne. Ainsi, à partir de 2013-2014, nous avons considéré que les anguilles migraient sur l’ensemble de la colonne d’eau à l’exception des deux mètres en surface ($\Lambda=2$).

L’examen des comportements d’anguilles dans le fond de la vanne les écoulements s’effectuent en volet (par le clapet de surface)), montre que ces dernières ne sont pas concernées par les écoulements en surface. Au contraire, en surface, on observe bien un comportement de migration verticale, avec une montée dans la colonne d’eau, qui se traduit par une apparition et une disparition des anguilles du faisceau du DIDSON et non une traversée comme c’est plus souvent le cas lorsque les écoulements sont linéaires au fond. En surface, les migrations sont donc extrapolées sur une zone représentant $\lambda=6$ fois la charge sur le volet. Ainsi, pour les trois années de suivi, la même approche a été utilisée : le nombre passant au niveau de la vanne correspond au nombre passant dans le cône de détection du DIDSON N_{o4} , extrapolé à l’ensemble de la fenêtre de migration.

Le ratio des surfaces F dépend donc de la hauteur de la colonne d’eau D_t ou de la charge sur le volet C_t qui est calculée à chaque pas de temps (formules 10 et 11).

$$N_{o4}(t, k) = N_4(t, k) \times F(t, k, \Lambda, \lambda) \quad (10)$$

$$F(t, k, \Lambda, \lambda) = \begin{cases} \frac{S(k)}{l(D_t - \Lambda)} \text{ au fond} \\ \frac{S(k)}{lC_t\lambda} \text{ en surface} \end{cases} \quad (11)$$

1.8.3 Migration sur l’ensemble du barrage

Nous faisons l’hypothèse qu’il n’y a pas de trajet de migration préférentielle au droit du barrage, c’est à dire que la répartition des anguilles entre les différentes vannes se fait au *pro rata* du débit.

$$N_4(t) = \frac{Q_4(t)}{Q(t)} \times N(t) \quad (12)$$

1.8.4 Migration jour/nuit

Comme les anguilles migrent majoritairement de nuit, les dépouillements ont été effectués sur les fichiers correspondant à la période nocturne. Pour la migration diurne, le pourcentage d’anguilles migrant de jour μ a été calculé.

$$N = \frac{\sum_{t=\text{nuit}} N}{1 - \mu} \quad (13)$$

1.8.5 Modélisation de la migration

Nous avons reconstitué les effectifs en migration lors des périodes sans suivi $N_{d\otimes}$ à partir des densités mesurées pour la même nuit dans un positionnement correct $N_{d\odot}$ et du volume d’eau transitant par le barrage V_{\odot} (equation 14).

$$N_{d\otimes} = \frac{\sum_{t,k} N(t, k) \odot * V_{\otimes}}{V_{\odot}} \quad (14)$$

Pour les jours où aucun suivi n’a été effectué à cause de problèmes techniques les effectifs $N_{d\oplus}$ ont été interpolés à partir de la tendance des effectifs journaliers par un modèle gam basé sur la tendance saisonnière et le débit.

1.8.6 Calcul des biomasses

Les biomasses en dévalaison ont été calculées à partir de la fréquence de taille corrigée des anguilles. Les fréquences des effectifs de chaque classe de taille de 5cm ont été calculées et multipliées par le poids moyen du centre de la classe, tel que prédit par la relation taille/poids calée sur les données régionales d’anguilles argentées (source AFB et EPTB-Vilaine).

2 Résultats

2.1 Suivi

2.1.1 Fonctionnement du barrage

Le barrage est resté fermé en septembre, octobre avec des ouvertures nocturnes à partir du 24 novembre (Figures 16 et 17). Depuis le pic de débit à $1\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ en 2013–2014, les débits sont restés faibles et on observe cette année deux pics de petite crue autour de $200\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Les turbidités ne montent au-delà de 50 NTU que lors de la principale crue (Figure 16).

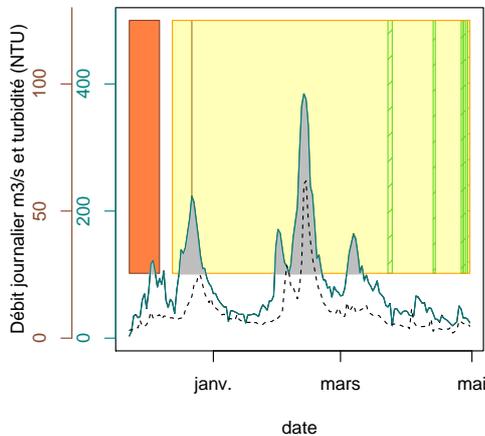


FIGURE 16 – Débit de la Vilaine ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ —) et turbidité (NTU, ---) pendant la période de migration. En ■ débits corrigés (moyennes journalières). En fond, problèmes de fonctionnement du sonar, en vert ■ erreurs ponctuelles d'acquisition, en orange, ■ problèmes de qualité, voir aussi la figure 41 dans la discussion pour le détail des horaires.

2.1.2 Dépouillement des fichiers

Le dépouillement correspond à du temps de lecture de fichier (Figure 18), il ne comprend pas la maintenance des données, l'inscription dans la base ou les vérifications. En prenant comme base un temps de dépouillement de 6 heures par jour, 5 jours par semaine, la durée totale de dépouillement est de l'ordre d'un peu moins d'un mois (Tableau 1). Ce temps a diminué par rapport à 2013-2014 car il était alors de deux mois et trois semaines. Le suivi sur

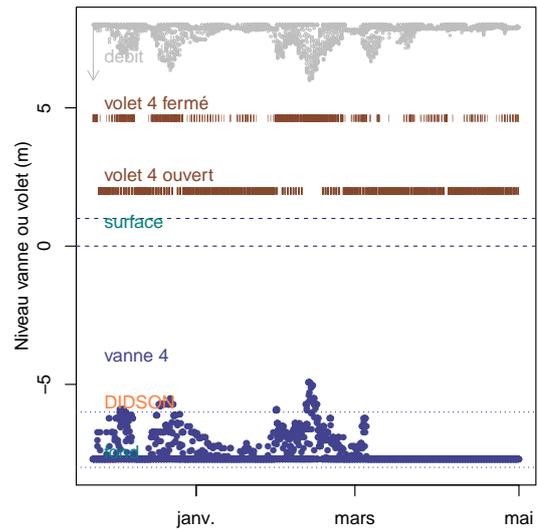


FIGURE 17 – Fonctionnement du barrage, ouverture de la vanne 4 et du volet 4 et débit de la Vilaine pendant la période de migration. Chaque point correspond à une valeur pendant 30 minutes.

site du fonctionnement du DIDSON correspond à 70 contrôles.

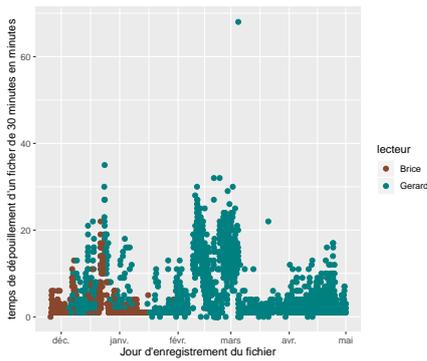
Tableau 1 – Temps de dépouillement des fichiers DIDSON en 2018–2019. Les temps donnés ne correspondent qu'au temps passé au dépouillement.

mois	temps
11	03 :20 :00
12	1 jour 23 :02 :00
1	19 :46 :00
2	3 jours 12 :43 :00
3	1 jour 15 :49 :00
4	1 jour 02 :02 :00
total	9 jours 04 :42 :00

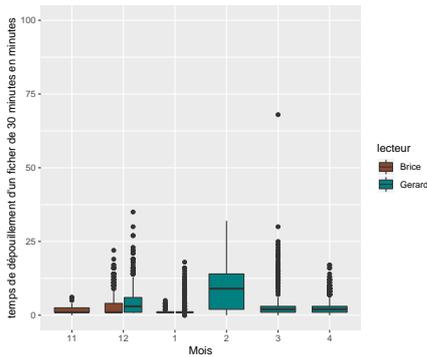
On retrouve des temps de dépouillement dépassant 30 minutes lors des pics de migration, la mesure des anguilles restant chronophage (Figure 18a). Cette année comme les autres, les fichiers ont été vérifiés grâce à la double inscription des dépouillements, à la fois dans un fichier excel, et après traitement des fichiers textes comprenant les données poisson.

Deux facteurs principaux gênent la lecture des fichiers du DIDSON, il s'agit de la présence d'alevins et de la présence de mulets. Comme lors des trois autres saisons, les présences gênantes d'alevins et de mulets peuvent exister en début de saison en octobre et novembre, sans toutefois constituer une gêne pour le comptage. Ils disparaissent en hiver avant de ré-

apparaître en mars (Figures 19, 20 et 42).



(a) Temps de dépouillement en 2018-2019.



(b) BoxPlot des temps de dépouillement en 2018-2019.

FIGURE 18 – Temps de dépouillement, distribution et boxplot.

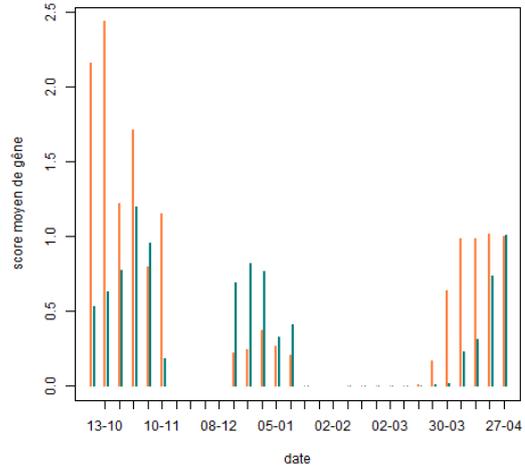


FIGURE 19 – Histogramme montrant la présence de mulets (—) et d’alevins (—) dans les comptages, les valeurs sont agrégées sous forme de moyenne à partir de scores allant de 0 (pas de mulets) à 5 (mulets très gênants pour le comptage).

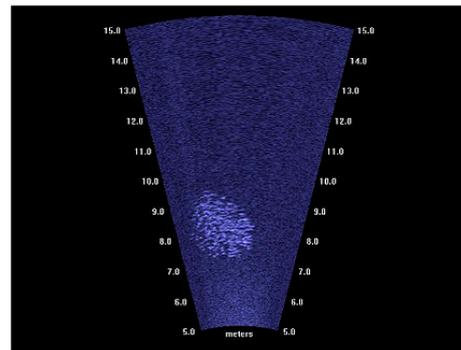


FIGURE 20 – Banc d’alevins le 24 avril 2015

Les mulets sont plus gênants que les alevins, avec une lecture difficile dès que le score dépasse 2, ce qui n’est arrivé qu’en octobre cette année. Les mulets ont toutefois une activité diurne et la gêne est en général concentrée en début et fin de nuit.

2.1.3 Problèmes dans le suivi

L’ensemble des problèmes techniques sont résumés sur les Figures 16, 41 pour le détail par 30 minutes, et 52 pour le graphique saisonnier.

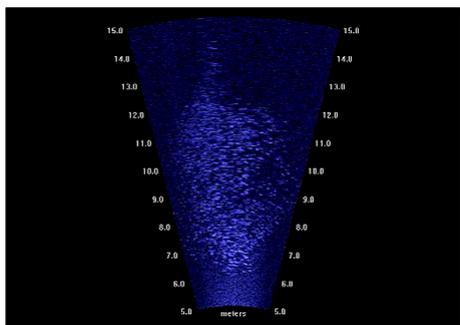


FIGURE 21 – Banc d’alevins le 26 avril 2015

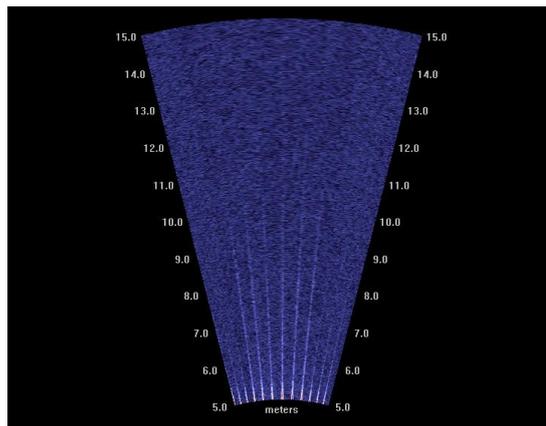


FIGURE 23 – Flash du DIDSON

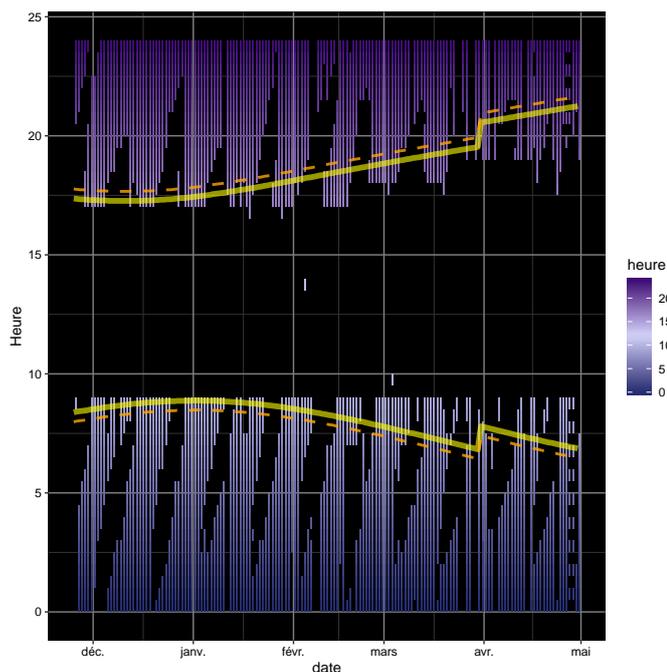


FIGURE 22 – Heures de début et de fin des fichiers dépouillés, et heures de lever et de coucher du soleil (en jaune). Les rectangles bleus à violet correspondent à des horaires de fichiers dépouillés, en noir pas de dépouillement, en orange début et fin des durées de pénombre civiles correspondant à une position du soleil à -6° en dessous de l’horizon.

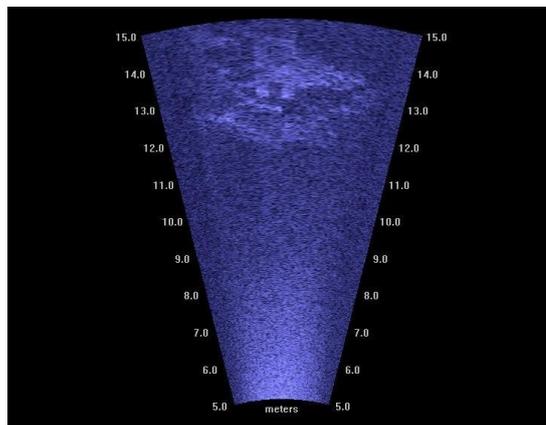


FIGURE 24 – Echo du DIDSON à la surface

Tableau 2 – Fonctionnement du DIDSON en fonction de l’ouverture de la vanne et de la position, s = appareil en surface, f = appareil en vannes, n appareil en panne, 0 enregistrement normal, 1 problème d’acquisition, 2 problèmes d’écriture sur le disque, 3 problèmes de qualité.

	f	s	n
0	930	3470	0
1	0	92	53
2	3	1	63
3	180	272	0

2.1.4 Positionnement du DIDSON

L'analyse du positionnement et du fonctionnement du sonar permettent de déterminer quelle est la part de valeurs manquantes, qu'il faudra extrapoler pour reconstituer les effectifs migrant au droit du sonar. L'utilisation de l'automate pour le placement du didson a permis de considérablement réduire les périodes où le DIDSON est mal placé. On peut résumer les fonctionnements du sonar dans la période de 17h à 9h sur l'ensemble de la saison de migration comme suit (Figure 25) :

- La vanne 4 est fermée (rectangles **noirs**), que ce soit en surface ou au fond, et il n'y a pas de passage possible. Cette situation correspond à 9% du temps ;
- Dans tous les autres cas, la vanne est ouverte
 - le DIDSON n'a pas pu être positionné (problèmes techniques) 23.7% du temps, rectangles **violet**
 - le DIDSON fonctionne, il est bien positionné 62.9% du temps (rectangles **turquoise**).
 - le DIDSON fonctionne, mais il est mal positionné **marron**, mais les fichiers ont quand même fait l'objet d'un dépouillement seulement 0.8% du temps.
 - les fichiers du DIDSON n'ont pas été lus, ou le DIDSON n'a pas fonctionné pendant 4% du temps (zones **grises**) ;

Cette année le positionnement du DIDSON a été très bon. En février et avril il y a quatre incidents d'écriture sur le disque (Figures 25d 25e 25f - en violet, Figure 52 rectangles verts). Les fichiers non dépouillés en gris correspondent majoritairement aux fichiers entre 9h et 10h après le lever du soleil (Figure 41).

Les périodes d'incident technique couvrent 24% du temps. Le *positionnement* du DIDSON par rapport aux ouvertures au fond ou en surface est correct dans 63% du temps. La vanne 4 (ou le volet 4) sont fermés 9% du temps.

2.1.5 Qualité des images

La qualité des anguilles détectées est notée par l'opérateur avec un facteur allant de 1 (très mauvaise qualité) à 5 (très bonne qualité). Les images

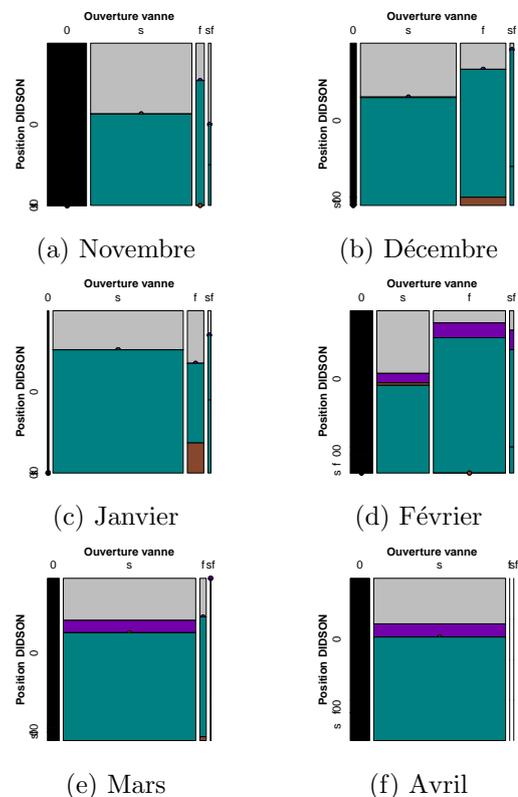


FIGURE 25 – Position du DIDSON et de la vanne 4, taille des rectangles relative au nombre d'occurrences d'un type de positionnement de vanne et d'un type de positionnement DIDSON pour chaque mois. En lignes, positionnement du DIDSON, 0 = pas de lecture, s = surface (Figure 9), f=fond (Figure 10). En colonnes, ouverture de la vanne, 0= pas d'ouverture, s=surface, f=fond, sf= surface et fond (l'ouverture change au cours des 30 minutes).

Couleurs : **violet** le DIDSON n'enregistre pas pour des raisons techniques, **noir** vanne fermée, **gris** pas de lecture, **turquoise** le DIDSON est bien positionné, **marron** le DIDSON enregistre mais il est mal placé ou encore (et c'est le cas pour la majorité des période en 2018-2019) la vanne 4 est fermée et une des vannes ou volet continue à débiter. Grâce à l'automate, le nombre de périodes où le DIDSON est mal placé sont considérablement réduites.

de qualité 1 sont écartées comme trop douteuses. L'analyse de la qualité des anguilles en fonction de leur taille et de la distance de détection montre des résultats cohérents. En surface et au fond, les résultats obtenus avant la dégradation du signal sont très similaires à ceux des saisons précédentes (Briand et al., 2018a,b, 2015b, 2016, 2019) (Figures 26a, 26c). On retrouve les éléments suivants :

- les effectifs diminuent avec la distance (largeur moins grande des colonnes),
- plus on s'éloigne du didson plus la qualité des images détectées diminue,
- la qualité est globalement meilleure en surface qu'au fond.

En comparaison, les données de qualité avant le 13 décembre sont très nettement dégradées. La dégradation des images intervient aussi dans la zone proche du didson. Ainsi les problèmes techniques ont probablement affecté la qualité de détection dans la zone de 5-11 m et ne sont pas réduits aux problèmes de détection des anguilles dans la zone au-delà de 11m (Figures 26b, 26d).

2.2 Taille des anguilles et efficacité

Une analyse séparée des efficacités a été menée en séparant les données recueillies entre le début de la saison avant la réparation, et la fin de la saison après le 12 décembre.

Pour chaque période, un calcul est fait sur le nombre total d'anguilles détectées (1 736) afin de déterminer l'efficacité de la détection en fonction de la distance au DIDSON et de la taille des anguilles. La structure de taille dépend clairement de la distance de détection mais aussi de la période. avec une pente plus importante de la baisse des effectifs en fonction de la distance au didson avant la réparation de la lentille (Figures 27, 28, 29).

La corrélation entre la taille des anguilles mesurées et la distance d'observation est significative (Pearson $\text{cor}=0$, $p<0.001$) (Figure 29).

Les tailles changent aussi en fonction de la période (Test χ^2 $p<0.001$). La Figure 30 teste l'hypothèse que les classes de tailles soient distribuées de manière homogène en fonction des mois. La couleur bleue indique qu'il y a plus d'anguilles dans une des classes que dans une distribution homogène. On retrouve le fait qu'il y ait moins d'anguilles de grande

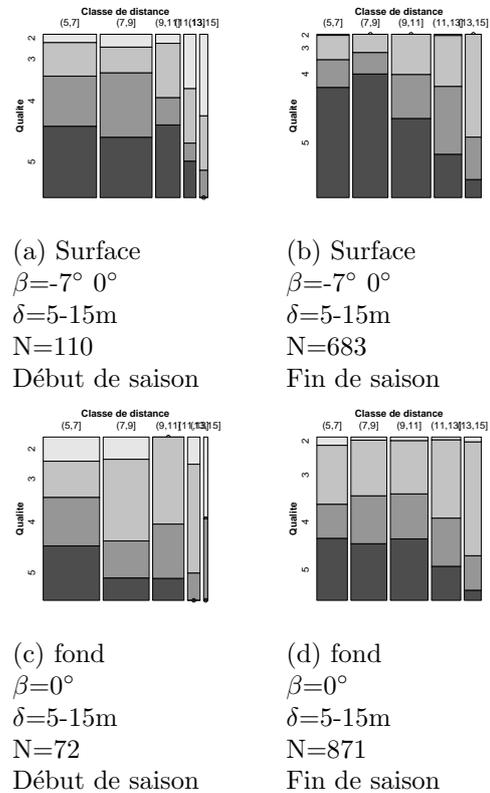


FIGURE 26 – Qualité des détections en fonction des classes de distance. A gauche les données de début de saison (phase myope), à droite les données de fin de saison. La largeur des rectangles est proportionnelle aux effectifs dans chaque classe. La hauteur est proportionnelle aux effectifs dans les différentes classes de qualité. Qualité 5 = pas de doute possible, qualité 1 = fort doute. A gauche, en début de saison 2018-2019 avant la réparation du 13 décembre, la déformation de la fente du concentrateur du tube focal en début de saison a entraîné une diminution de la qualité des images loin du didson et une baisse des détections, comme lors de la fin de la saison 2017-2018.

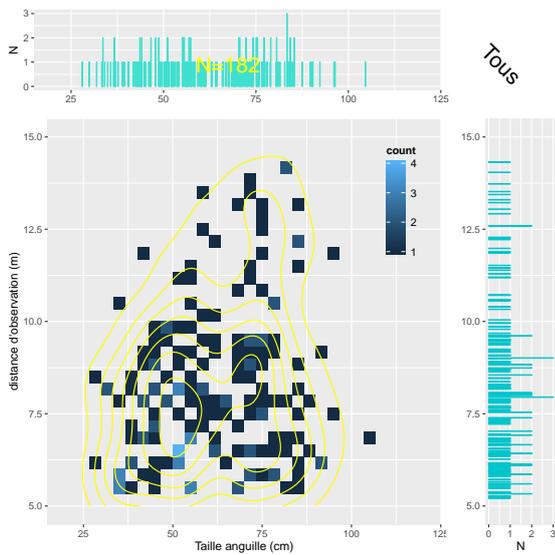


FIGURE 27 – Taille des anguilles en fonction de la distance au sonar. Couleur en fonction du nombre d’observations par carré. Les polygones d’isodensité permettent de mettre en évidence la relation distance - taille (les plus petites anguilles ne sont visibles que près du DIDSON). Les données correspondent aux anguilles détectées avant le 13 décembre, c’est à dire avant les problèmes liés à la déformation de la lentille.

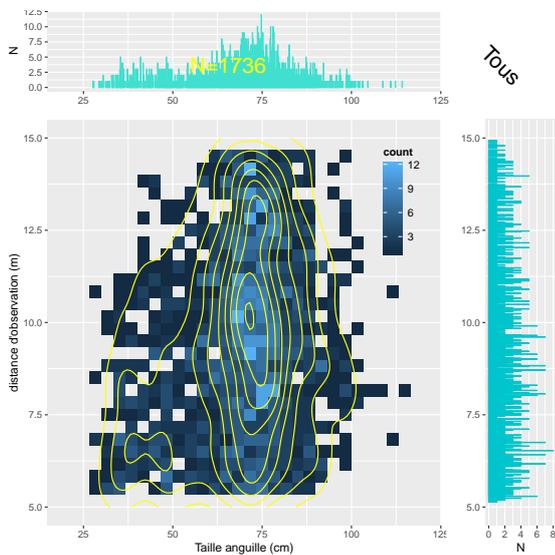


FIGURE 28 – Taille des anguilles en fonction de la distance au sonar. Couleur en fonction du nombre d’observations par carré. Les polygones d’isodensité permettent de mettre en évidence la relation distance - taille (les plus petites anguilles ne sont visibles que près du DIDSON). Les données correspondent aux anguilles détectées après le 13 décembre, c’est à dire une fois que la lentille du didson a été réparée.

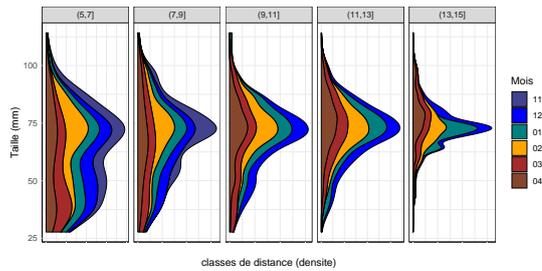


FIGURE 29 – Structure de taille des anguilles en fonction de la distance au sonar et du mois. **Les détections de novembre en bleu au sommet des graphes⁴ sont probablement affectées par la "myopie" du didson avant réparation de la lentille.**

taille et plus d’anguilles de petites tailles (mâles <45 mm) début de saison (Figure 30). *A contrario*, les anguilles de plus petites tailles sont moins nombreuses en février (en rouge). Les distributions de taille de mars et avril sont plus délicates à interpréter mais pourraient indiquer une reprise de migration des anguilles jaunes en mars et la confusion avec des lamproies en avril.

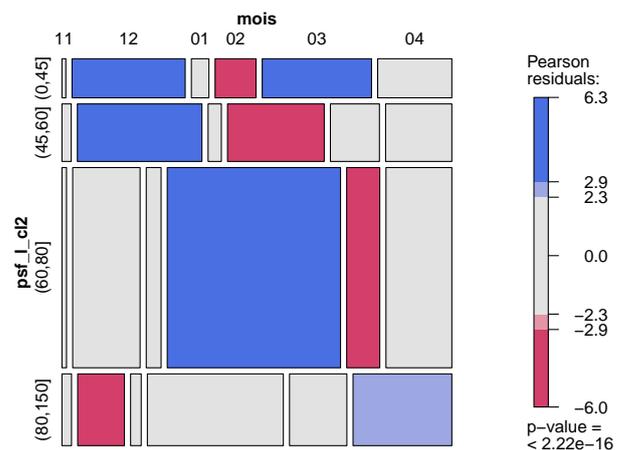


FIGURE 30 – Diagramme en mosaïque montrant la relation entre la taille et le mois. En rouge et bleu, les catégories qui sont significativement différentes au seuil de 90 et 99% (Zeileis et al., 2007).

La structure en *taille* des anguilles varie en fonction de la distance au DIDSON. La réparation de la fente de la chambre d'acquisition ne s'est effectuée que le 13 décembre. Les anguilles sont plus difficiles à détecter loin du DIDSON. L'efficacité de la détection est également plus faible pour les petites anguilles.

110 anguilles ont été observées en début de saison alors que la lentille n'était pas encore réparée. Après le 13 décembre les détections d'anguilles correspondent à 683 anguilles.

On retrouve comme les autres années, la diminution en fonction de la distance pour les petites anguilles <45cm (trait bleu pointillé, Figure 31), et pour la classe de taille 45–60 cm (trait vert pointillé, Figure 31).

En l'absence de problème de détection *i.e* pour une efficacité de 100%, les effectifs devraient augmenter à mesure que la distance augmente du fait de l'augmentation de la taille du faisceau (voir formule 6). Une fois corrigés de l'effet d'augmentation de la taille du faisceau, les effectifs (traits pleins) devraient théoriquement être constants d'une classe de distance à l'autre. La diminution, sur l'ensemble des classes de taille, nous indique que sur l'ensemble des dépouillements en volets, il y a une perte d'efficacité du DIDSON à mesure que l'on s'éloigne de l'appareil (Figure 31). Il y a donc une relation entre la distance au DIDSON et la probabilité de détecter les anguilles.

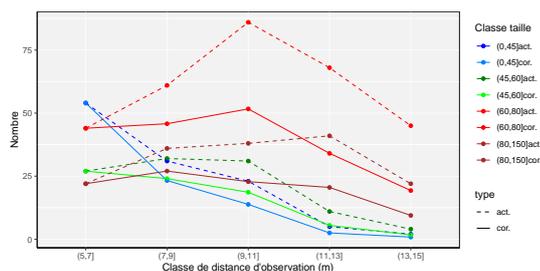


FIGURE 31 – Effectifs observés (traits pointillés) et corrigés de l'augmentation de la taille du faisceau (traits pleins) en fonction de la distance lorsque le DIDSON est positionné en surface après la réparation du concentrateur du 13 décembre.

Lorsque le DIDSON est au fond à une distance de 5–15m, les diminutions d'effectifs suivent un profil ressemblant à celui des autres années, à l'exception du déficit apparent dans le secteur le plus proche de

l'appareil⁵ (Figure 32).

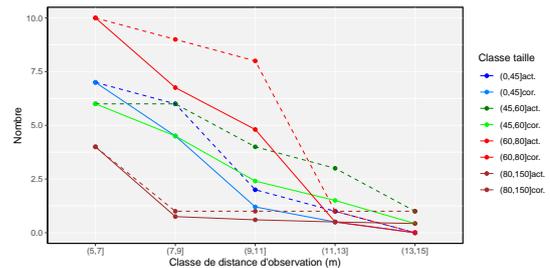


FIGURE 32 – Effectifs observés (traits pointillés) et corrigés de l'augmentation de la taille du faisceau (traits pleins) en fonction de la distance lorsque le DIDSON est au fond en position 0/+5° 5-15m. Données collectées avant le 13 décembre (durant la phase myope du didson).

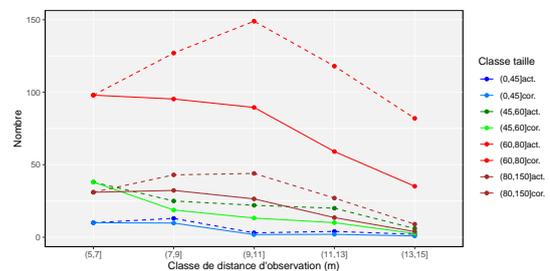


FIGURE 33 – Effectifs observés (traits pointillés) et corrigés de l'augmentation de la taille du faisceau (traits pleins) en fonction de la distance lorsque le DIDSON est au fond en position 0/+5° 5-15m. Données collectées après le 13 décembre (concentrateur réparé).

2.2.1 Calcul de l'efficacité en phase myope

L'année précédente, après le 23 mars, le nombre de détection s'était effondré, le didson ne semblait pas en mesure de voir des anguilles au-delà de 11 m et les anguilles vues étaient de moins bonne qualité qu'au début de saison. Le DIDSON semblait atteint d'une myopie sévère. Cette dernière a été attribuée à une déformation du concentrateur du tube focal, qui n'est peut-être pas revenu en position du fait d'un assouplissement de la pièce en caoutchouc qui permet de focaliser le faisceau reçu dans la lentille. Cette pièce n'a été réparée que le 13 décembre. Pour cette raison une analyse séparée est effectuée sur les effectifs en migration avant et après le 13 décembre.

5. sur les traits pleins correspondant aux effectifs corrigés, les effectifs commencent par augmenter puis diminuer en fonction de la distance au didson (Briand et al., 2018b, 2019)

Les effectifs concernés par la phase de suivi de début de saison sont assez limités au fond (N=72), et ils ne permettent pas d'analyse très précise de l'efficacité du DIDSON. Une analyse est effectuée en y ajoutant les effectifs en surface (N= 683). Dans cette configuration dégradée, il n'est pas trouvé de différence entre le fond et la surface, et le seul paramètre significatif dans le glm de l'efficacité est la distance au DIDSON, ce paramètre n'est d'ailleurs significatif qu'au seuil de 0.1 (Figure 34, Tableau 3).

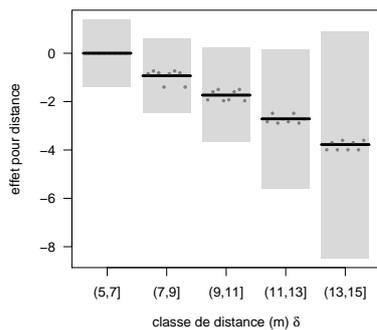


FIGURE 34 – Prédictions et résidus de la modélisation linéaire de l'efficacité du DIDSON, en fonction de la taille et de la distance au DIDSON, pour les cinq positions du sonar en début de saison.

Tableau 3 – Analyse de variance du modèle logit des efficacités pour le début de saison (phase myope). δ = distance au DIDSON, la taille des anguilles n'est pas significative dans le modèle, la position du didson (surface ou fond) n'est pas non plus significative

	df	dev.	res. df	res. dev.	$P(>\chi^2)$
Resid.			39	8.9	
δ	4	7.59	35	1.3	0.108

2.2.2 Calcul de l'efficacité en fin de saison

L'efficacité est calculée en fonction de la distance au didson δ , de la position vanne ou volet (k), et de la taille des anguilles τ (Formule 6). La distance au didson intervient comme un facteur qualitatif. On force l'efficacité de détection à diminuer de manière linéaire avec la taille τ : plus les anguilles sont petites, plus la détection est difficile. L'efficacité est ensuite calculée à l'aide d'un modèle linéaire généralisé binomial (Formule 7). Le modèle retenu est le modèle $\delta + \tau + k$ sans interaction avec la position. La prise en compte des interactions pour la taille

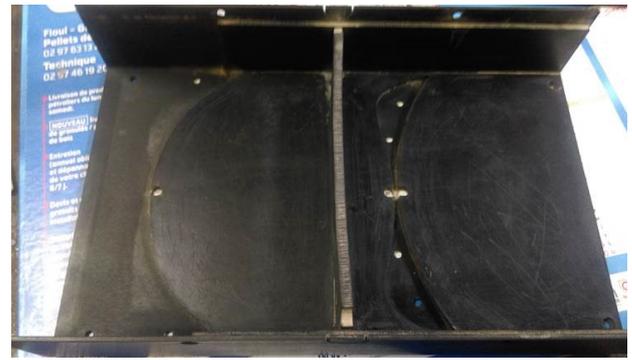


FIGURE 35 – Déformation de la fente d'entrée de la lentille acoustique en début de saison.

($\tau * k$) ou pour la distance ($\delta * k$) conduit à des modèles ayant un AIC moins bons (Figure 36, Tableau 4)).

Tableau 4 – Analyse de variance du modèle logit des efficacités pour la fin de la saison (après réparation de la fente de la chambre d'acquisition). k =position du DIDSON, τ = taille, δ = distance au DIDSON, k position du didson. Cette année le meilleur modèle ne montre pas d'interaction entre la position et la taille ou la distance ce qui signifie qu'il n'y a pas d'effet de la position fond ou surface sur la l'augmentation de la probabilité de détection des anguilles en fonction de la taille et sa diminution en fonction de la distance

	df	dev.	res. df	res. dev.	$P(>\chi^2)$
Resid.			39	25.1	
τ	1	2.74	38	22.4	0.098
δ	4	16.33	34	6.1	0.003
k	1	0.02	33	6.0	0.882

L'efficacité moyenne (Formule 8) est de 56% en surface et 52% en position fond. Elle a été évaluée à 17% avant la réparation de saison.

2.3 Migration

2.3.1 Migration en fonction du cycle nyctéméral

Le suivi des migrations a été effectué entre 18 h et 8 h (Figure 22). Les deux années 2013–2014 et 2014–2015, c'est le coefficient calculé en 2013–2014 $\mu = 11.9\%$ qui avait été utilisé (Briand et al., 2015b, 2016) puis une valeur de 5.6 % pour les trois années

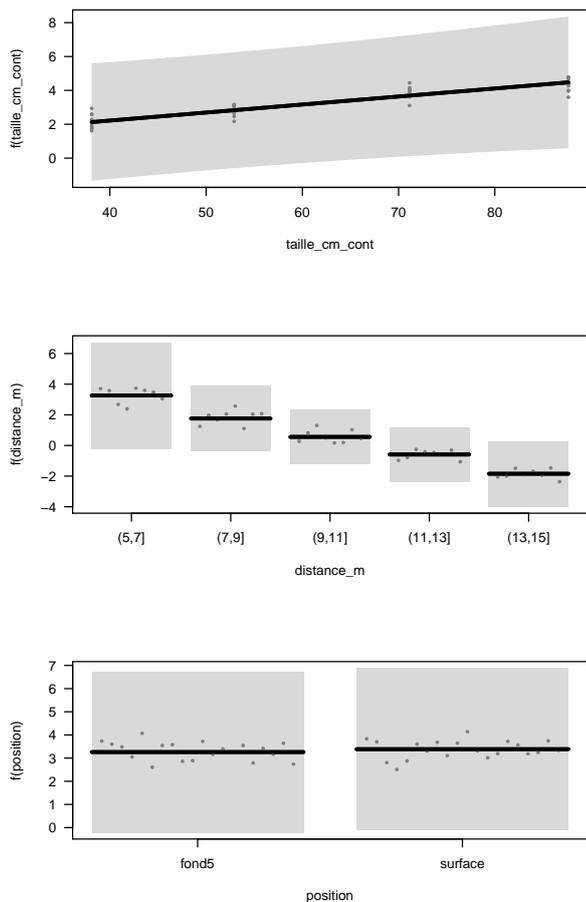


FIGURE 36 – Prédications et résidus de la modélisation linéaire de l’efficacité du DIDSON, en fonction de la taille et de la distance au DIDSON, pour les deux positions du sonar en fin de saison.

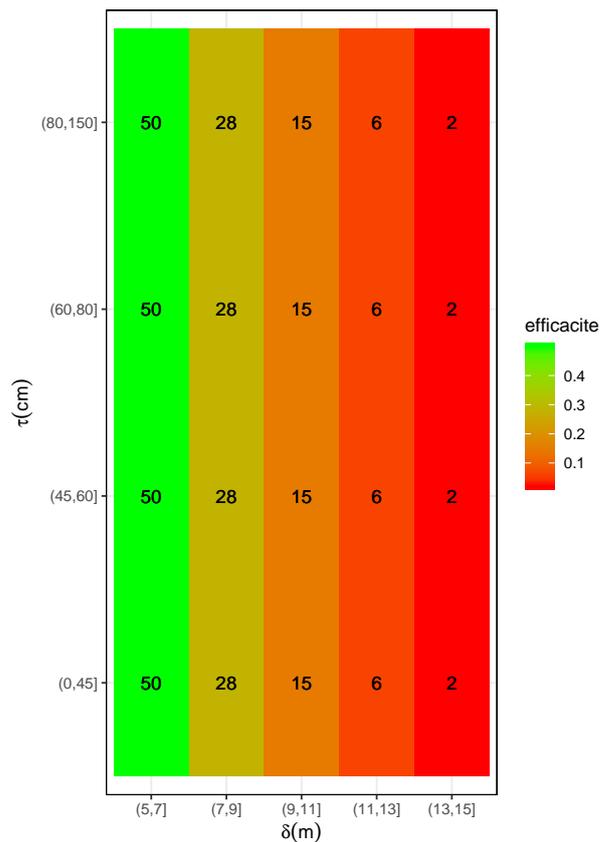


FIGURE 37 – Efficacité en fonction de la taille et de la distance au DIDSON, commune aux deux positions du sonar, fond et surface, en début de saison.

suivantes. Cette année encore le coefficient de 5.6 % sera utilisé.

Sur l'ensemble du suivi de 17h à 9h (Figure 39a), cette année la migration la plus importante se fait entre 22 h et 1h du matin (Figure 39).

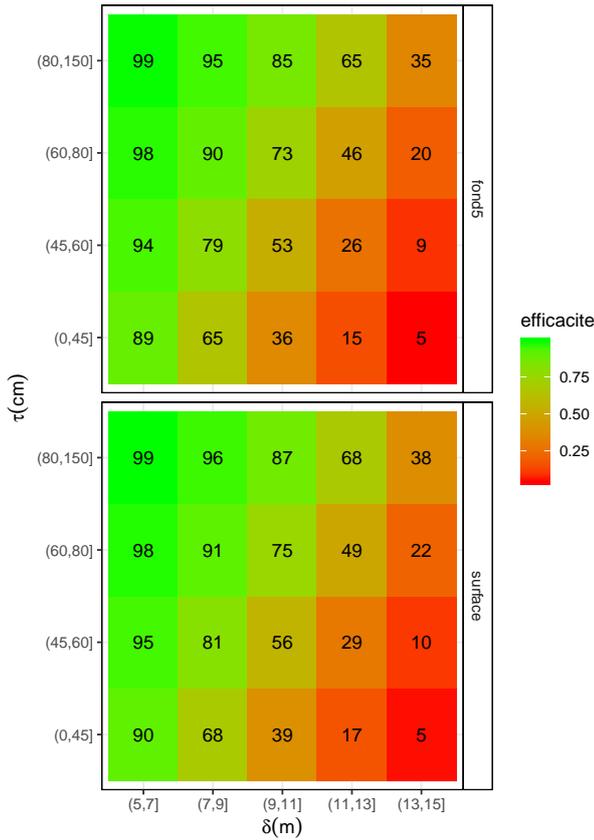
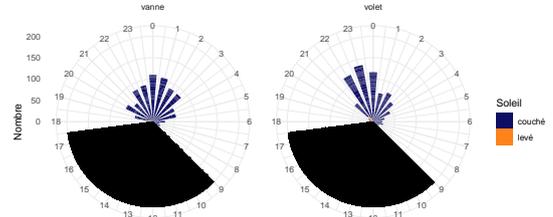


FIGURE 38 – Efficacité en fonction de la distance au DIDSON, de la classe de taille et de la position du didson (fond ou surface).



(a) tous, de 18h à 8h

FIGURE 39 – Horaires de passage des anguilles en fonction de pour tous les jours d’octobre à mai entre 18 h et 8h, avec à gauche les suivis en fond, à droite les suivis en surface.

2.3.2 Comportement de migration

Les différents comportements de nage, et de traversée du faisceau, sont décrits en matériel et méthode (paragraphe 1.7). Il semble y avoir un effet du type de nage sur la probabilité qu’une anguille traverse tout l’écran (χ^2 p=0.005). Les anguilles en nage à contre courant ont en effet une probabilité plus forte que les autres de rentrer dans le faisceau. La proportion d’anguilles effectuant une traversée complète (19%) est faible ce qui indique une prospection verticale de la colonne d’eau par les anguilles. Comme pour les trois autres saisons, cette prospection est plus importante lorsque le DIDSON est positionné en surface (tableau 6).

Tableau 5 – Effectifs de comportements observés en surface et en vannes, A migration en arrière, R reste sur place, M migration active vers l’aval, <-> traversée complète, In entrée par le dessus ou le dessous, Out sortie par le dessus ou le dessous

	<->	In	Out
Backsliding	34	92	18
Hanging	1	22	11
Running	298	1042	218

Tableau 6 – Pourcentage d’anguilles effectuant la traversée du faisceau, $\langle - \rangle$ traversée complète, In entrée par le dessus ou le dessous, Out sortie par le dessus ou le dessous, N vanne=943, N volet=793.

	fond	surface
$\langle - \rangle$	25	12
In	65	69
Out	10	19

2.3.3 Biomasses et sexe ratios

La courbe taille poids calculée en 2012–2013 est utilisée pour prédire les distributions de poids d’anguilles à partir des tailles mesurées au DIDSON (Figure 40). Le poids moyen des anguilles est estimé à 554g. Les sexes ratios calculés en utilisant une li-

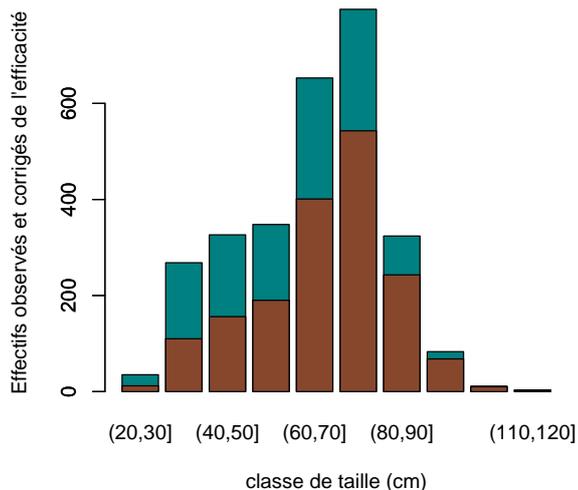


FIGURE 40 – Structure en taille des anguilles, en bleu foncé effectifs bruts, en marron effectifs corrigés de l’efficacité.

mite de taille entre les mâles et les femelles à 450 mm (Acou et al., 2010) s’établissent à 7 % de mâles. On observe une tendance claire à la diminution du nombre de mâles avec des pourcentages inférieurs aux valeurs de 12 et 15 % des années 2012-2013 et 2013-2014 (Briand et al., 2014, 2015b), 9% en 2014-2015 et 2015-2016 (Briand et al., 2018a, 2016) 7% en 2016-2017 (Briand et al., 2018b) et 5% en 2017-2018.

D’après la structure en taille corrigée de l’efficacité, le poids moyen des anguilles argentées est estimé à 554g pour la dévalaison 2018–2019. Cette valeur est très proche du poids de 533 g estimé l’année précédente.

2.3.4 Estimation des effectifs migrants

Un total de 1 736 anguilles a été compté au DIDSON, pour les fichiers correspondant au meilleur filtre (CSOT) de dépouillement. Ce nombre diminue à 1 710 anguilles lorsqu’on ne sélectionne que les anguilles comptées entre 18 h et 8h . Puis il diminue encore à 1 675 lorsqu’on ne sélectionne que les fichiers pour lesquels le DIDSON est positionné correctement, et qui ne présentent pas de problème de qualité, d’écriture ou d’acquisition. Les fichiers pour lesquels l’acquisition est jugée correcte \odot correspondent à 63% du temps.

A partir de cette sélection, les différentes étapes d’extrapolation conduisent aux effectifs N_{\odot} décrits au tableau 7. Les effectifs comptés pour chaque position du DIDSON et chaque pas de temps $N'_{o4}(t, k)$ sont divisés par l’efficacité $E(k)$ et le facteur ρ pour obtenir les effectifs corrigés au droit du DIDSON $N_{o4}(t, k)$ suivant la formule 8.

A partir de ces effectifs, les données sont extrapolées au niveau de la vanne $N_4(t, k)$ en utilisant la surface totale diminuée d’une tranche d’eau de 2 m en surface lorsque les écoulements se font par le fond. Elles sont extrapolées comme les autres années à une zone correspondant à 6 fois la charge sur le volet lorsque les écoulements se font en surface (coefficient $\lambda=6$). Enfin, les effectifs sont extrapolés à l’ensemble du barrage pour obtenir la prédiction N_{\odot} (Formule 12). Lors de cette dernière extrapolation, on corrige aussi des effectifs estimés de jour pour obtenir la migration sur l’ensemble du cycle journalier (Formule 13).

2.3.5 Prédiction pour les données manquantes

La deuxième étape du calcul des effectifs correspond à la prédiction des migrations lorsque le DIDSON est dans une mauvaise position (\otimes), c’est à dire en surface alors que les écoulements sont au fond, et au fond alors que les écoulements sont en surface ou quand le DIDSON est en arrêt technique. Le nombre

de données correspondant à ce type de configuration est de 1 880 enregistrements (\otimes), contre 3 184 enregistrements en fonctionnement normal (\odot). Les effectifs extrapolés à partir des migrations observées le même jour est de $N_{\otimes}=11\ 170$ anguilles argentées.

Il y a eu cette année 3 journées avec aucun d'enregistrement du fait de problèmes d'acquisition ou d'écriture disque (Figure 41). Pour ces jours, un modèle Gam a été utilisé pour extrapoler les effectifs en migration à partir des valeurs des jours proches (\oplus). La migration correspondant à ces jours est estimée à $N = 922$ anguilles argentées.

Tableau 7 – Extrapolation des effectifs, N'_{o4} effectifs comptés au droit du sonar, N_{o4} =effectifs corrigés de l'efficacité du DIDSON, N_4 =effectifs estimés au droit de la vanne, N = effectifs estimés sur l'ensemble du barrage, $N'_{o4}\otimes$ = effectifs comptés au didson alors que celui-ci est mal positionné par rapport à l'écoulement, \odot = période de suivi complet sans problème de qualité, \otimes =période de suivi extrapolée à partir des densités moyennes du jour, problème d'enregistrement ou de qualité ou mauvais positionnement du DIDSON, en marron(4) sur la figure 41 et orange sur la figure 25 \oplus =périodes sans suivi, les points d'interrogation indiquent des extrapolations incertaines.

	$f5$	s	n	Σ
$N'_{o4}\odot$	824	171	680	1 675
$N_{o4}\odot$	1 587	992	1 220	3 800
$N_4\odot$	8 507	3 584	3 299	15 389
$N\odot$	30 056	11 575	10 855	52 486
$N'_{o4}\otimes$	22	0	13	35
$N\otimes(?)$				11 170
$N\oplus(?)$				922
$N\odot\otimes\oplus(?)$	30 056	11 575	10 855	64 578

Les différentes étapes de la reconstitution des effectifs sont résumées dans le tableau 7 et aboutissent à l'estimation d'un effectif de 64 578 anguilles argentées en dévalaison. A partir de l'ensemble des effectifs ($\odot+\otimes$) et du poids moyen calculé au paragraphe 2.3.3, la biomasse d'anguille est estimée à 35.8 tonnes.

La migration estimée par mois est présentée au tableau 8.

Tableau 8 – Effectif mensuel d'anguilles argentées estimé sur la Vilaine.

mois	effectif
novembre	588
décembre	21139
janvier	1625
février	25912
mars	7586
avril	6011

Les effectifs extrapolés à partir des données considérées comme fiables ($N_{\odot}=52\ 486$), les effectifs modélisés pour les mauvaises configurations ($N_{\otimes}=11\ 170$) et les effectifs extrapolés pour les jours sans estimation ($N_{\oplus}=922$) donnent une estimation quantitative partielle des effectifs d'anguilles argentées en dévalaison sur la Vilaine $N=64\ 578$ soit 35.8 tonnes (Tableau 7).

3 Discussion

3.1 Migration

La septième année de suivi des migrations à l'aide du DIDSON correspond globalement à un très bon positionnement du sonar. Les seuls manques sont les arrêts de disque et ils ne concernent probablement que des effectifs faibles en fin de saison. La réparation du concentrateur le 13 décembre n'intervient qu'après le premier pic de crue.

La question qui se pose est de savoir si les corrections d'effectifs apportées par l'hypothèse de baisse de 50 % de l'efficacité de la détection sont réalistes.

D'un côté, lors de cette période, les biais induits par ce dysfonctionnement sont probablement moins marqués qu'à la fin de l'année précédente car des anguilles sont détectées dans les deux classes de distance les plus éloignées du didson, alors qu'elles étaient presque absentes en 2017-2018 mais aussi car la qualité est globalement du deux fois supérieure à celle observée à la fin de saison précédente (Briand et al., 2019). La faible turbidité en début de saison ou peut être une déformation moins marquée de la lentille sont à mettre en avant.

D'un autre côté, l'examen de la migration lors d'augmentation graduelle des débits jusqu'au premier pic de crue montre une absence suspecte de

migration en tout début de saison. C'est possible, de tels effets retardés de la reprise de débit ont déjà été observés sur la Vilaine, toutefois la migration reste faible lors du premier pic de crue les 10 et 11 décembre avec 91 et 244 anguilles argentées alors qu'elle est estimée à 5 880 anguilles argentées le 6 décembre pour un débit similaire. C'est d'ailleurs seulement à partir du 6 décembre au soir que les opérateurs notent une amélioration notable de qualité "sans doute parce que le slit a bougé le jour même". Il est donc très probable qu'un pic de migration équivalent à celui observé après le 6 décembre ait eu lieu, mais n'ait pas été détecté. La taille des fichiers est d'ailleurs très faible alors que le didson est positionné en vannes une partie de la nuit entre le premier et le 4 décembre.

Les effectifs recalculés durant cette période 10 855 anguilles sont donc incertains, mais restent de l'ordre de grandeur de ceux observés⁶ lors du premier pic de crue en 2017–2018 (Briand et al., 2019) et la migration de 64 578 est probablement correcte en terme d'ordre de grandeur ce qui tend à confirmer la tendance à la baisse des effectifs observée depuis 2012. Notre conclusion est qu'il y a réellement une tendance à la baisse des migrations (Tableau 11).

Globalement, l'attention portée au bon positionnement du DIDSON, les contrôles réguliers et surtout le fonctionnement de l'automatisme de positionnement vertical du sonar ont permis un très bon suivi. Les périodes sans suivi correspondent à des fermetures complètes de la vanne 4 et un écoulement sur les autres parties du barrage.

3.2 Biais et précision

3.2.1 Confusion avec d'autres espèces

L'anguille présente une morphologie et une nage particulière qui permettent de la discerner des autres poissons (Langkau et al., 2012). Cette année de nouveau très peu de lamproies marines (*Petromyzon marinus*) ont été détectées, alors que le DIDSON positionné au fond était dans une bonne configuration pour voir des lamproies (Figure 43). Cette tendance est conforme à la forte baisse de migration des lamproies marines observée sur la passe.

6. 17000 anguilles ont été observées en huit jours lors du premier pic de crue de la saison 2017–2018.

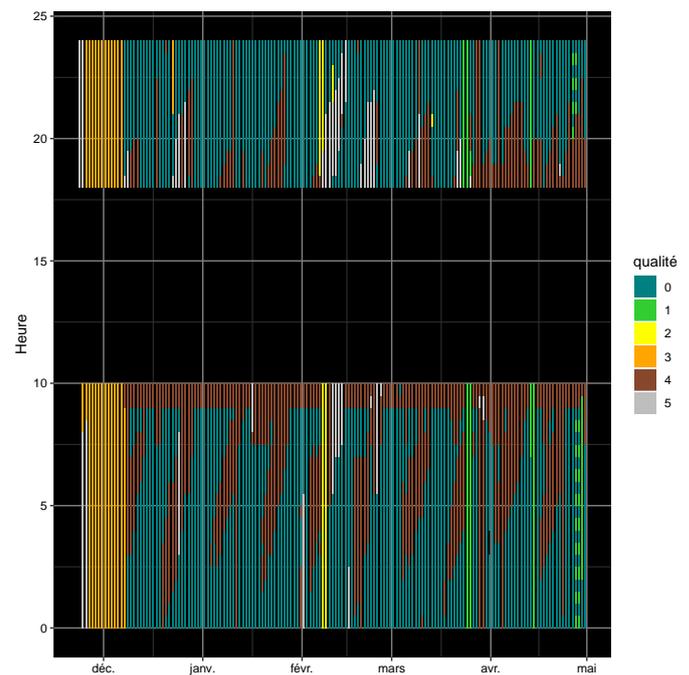


FIGURE 41 – Fonctionnement du DIDSON. Les rectangles correspondent chacun à une période d'enregistrement, 0 ■ enregistrement normal, 1 ■ problème d'acquisition, 2 ■ problème d'écriture, 3 ■ problème de qualité, 4 ■ mauvais positionnement du DIDSON ou écoulement ailleurs sur le barrage, 5 ■ vanne fermée mais ensemble du barrage fermé également.

Tableau 9 – Nombre de lamproies marines comptées au DIDSON en fonction des saisons de suivi. Entre parenthèse les anguilles en direction montante.

Année	effectif
2012–2013	640
2013–2014	29
2014–2015	275
2015–2016	655+(278)
2016–2017	7+(1)
2018–2019	2+(0)

3.2.2 Taille des anguilles

La résolution du DIDSON est calculée à partir de la largeur du faisceau (qui correspond à la moitié de la distance) et du nombre de faisceaux (96) lorsque le DIDSON est configuré en haute fréquence. La taille des anguilles mesurées correspond au nombre de faisceaux rencontrés par la cible, mais elle est légèrement sous-estimée (Bilotta et al., 2011). En effet la taille dépasse légèrement un faisceau sans entrer en contact avec le faisceau suivant. L'erreur de mesure est au maximum de 1 cm à 2m et elle augmente linéairement jusqu'à 7 cm à 15 m. Globalement on observe une diminution année après année de la proportion d'anguilles mâles. Ce phénomène indique très probablement un problème de recrutement au niveau du bassin de la Vilaine pour les cohortes en migration.

FIGURE 42 – Mulets ou anguille ?

3.2.3 Efficacité moyenne

Les efficacités de début de saison ont été fixées à une valeur faible. Pour le calcul de l'efficacité on fixe une valeur de départ à 100% près du didson : toutes les anguilles de la plus grande classe de taille sont détectées. Pour corriger le problème de détection l'hypothèse d'efficacité maximale est divisée par deux⁸. L'année précédente, il y a eu une alternance entre des périodes où pratiquement aucune détection ne pouvait être faite et des périodes plus favorables. Les raisons pour lesquelles certaines périodes étaient plus difficiles que d'autres pour la détection ne sont pas clairement élucidées mais c'est peut-être lié à la déformation du concentrateur. Il est possible qu'à certains moments, cette lentille ait été plus déformée qu'à d'autres. C'est peut être ce qui s'est passé lors du premier pic de crue. L'efficacité moyenne du didson lors du reste de la saison est "dans la moyenne" en surface, elle est quand même plus faible au fond (52 contre 53-63 sur les années précédentes) Tableau 10.

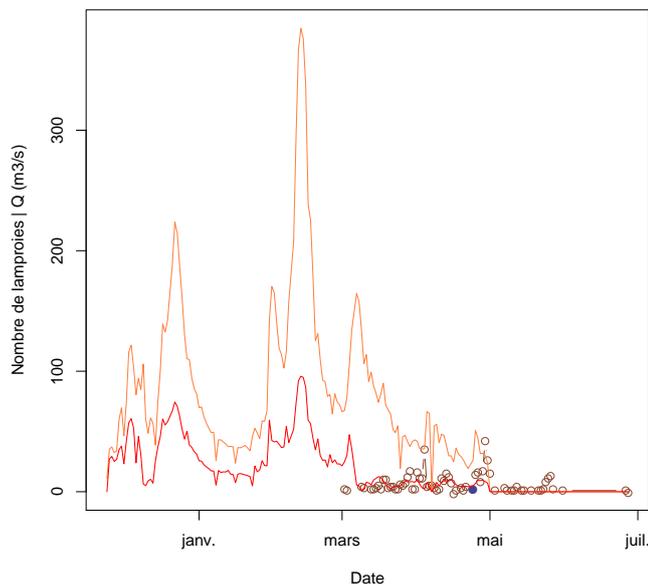


FIGURE 43 – Effectifs journaliers de lamproies en migration, en bleu – mesurés au droit du DIDSON, en marron -o- effectifs comptés en migration sur la passe à bassins⁷ (Briand et al., 2015b), en rouge – débits moyens journaliers sur la vanne 4, en orange – débits moyens journaliers sur l'ensemble du barrage.

3.3 Synthèse inter-annuelle

3.4 Comparaison à la production estimée par le modèle EDA

Le modèle EDA2.1 de Jouanin et al. (2012) estimait la production d'anguilles de la Vilaine à $N=87\ 500$

8. 50 % d'efficacité au lieu de 100 %

Tableau 10 – Efficacités moyennes mesurées pour les différentes positions du DIDSON pour les 6 saisons de suivi. * Hors problèmes de concentrateur

Année	surface	fond 5-15m
2012–2013	65	53
2013–2014	58	58
2014–2015	60	53
2015–2016	59	55
2016–2017	53	63
2017–2018*	36	60
2018–2019*	56	52

Tableau 11 – Production en anguilles argentées de la Vilaine à partir des comptages au DIDSON en fonction des saisons de suivi. Débit maximum journalier $Q_{jmax} m^3 \cdot s^{-1}$, *=comptage partiel.

Année	effectif	$(Q_{jmax} m^3 \cdot s^{-1})$
2012–2013	130 000	750
2013–2014	119 616	1000
2014–2015	69 509*	400
2015–2016	114 186	320
2016–2017	81 366	200
2017–2018	68 160	200
2018–2019	64 578	200

en amont du barrage d’Arzal. La version de EDA2.2, donne une estimation plus basse à 49 622 (Briand et al., 2015a). Le sexe ratio prédit par EDA 2.02 (53 % de mâles) ne correspond pas au sexe ratio estimé à partir des comptages au DIDSON (7 %) de mâles, mais ce problème de surestimation des proportions de mâles par EDA est bien identifié sur l’ensemble des sites index. En termes d’effectif, le nombre d’anguilles argentées extrapolé pour la Vilaine en 2018–2019 $N=64\,578$ semble indiquer une tendance à la diminution des effectifs (Tableau 11).

3.5 Remerciements

Les principaux remerciements, vont au personnel d’exploitation du barrage d’Arzal, Gilbert Olivier, Laurent Philippot, Thierry Besnard, Johann Dalhem et Adolphe Charles pour leur aide au quotidien. De grands remerciements également à Stéphane Leguen du Lycée Aristide Briand pour son aide dans la correction des défauts de l’automate gérant la position verticale du DIDSON. Cette étude a été financée par l’Agence de l’eau Loire Bretagne.

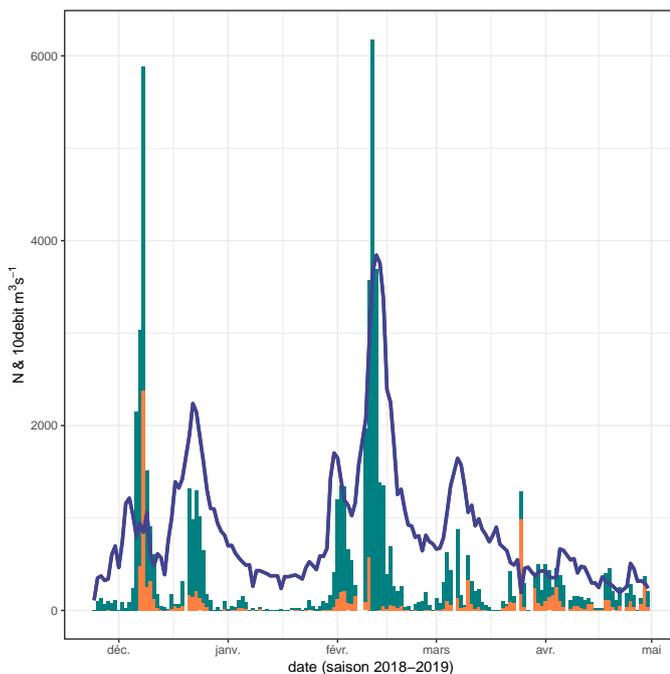


FIGURE 44 – Effectifs journaliers estimés sur l’ensemble du barrage, en turquoise (N) ⊙ \blacksquare = effectifs mesurés, en orange N ⊗ \blacksquare = effectifs extrapolés à partir de données de densité recueillies dans la journée. En mauve, N ⊕ \blacksquare effectifs extrapolés à partir des données des jours voisins. En bleu foncé — , débits journaliers estimés au barrage d’Arzal $m^3 \cdot s^{-1}$ (multipliés par 10 pour des raisons graphiques).

Références

- Acou, A., Boury, P., Boisneau, C., Bodin, M., et Feunteun, E. 2010. Estimation du potentiel reproducteur en anguilles argentées de la Loire amont : saisons de migration 2001-05 à 2008-09. Rapport technique, CRESCO, Dinard - Muséum National d'Histoire Naturelle.
- Bilotta, G.S., Sibley, P., Hateley, J., et Don, A. 2011. The decline of the European eel *Anguilla anguilla* : quantifying and managing escapement to support conservation. *Journal of fish biology* **78**(1) : 23–38.
- Briand, C., Sauvaget, B., et Eriau, G. 2018a. Suivi de la dévalaison d'anguilles argentées en 2015-2016 (quatrième année) sur la Vilaine à l'aide d'un DIDSON. Rapport technique, EPTB Vilaine.
- Briand, C., Sauvaget, B., et Eriau, G. 2018b. Suivi de la dévalaison d'anguilles argentées en 2016-2017 (cinquième année) sur la Vilaine à l'aide d'un DIDSON. Rapport technique, EPTB Vilaine.
- Briand, C., Beaulaton, L., Chapon, P.m., Drouineau, H., et Lambert, P. 2015a. Eel density analysis (EDA 2.2) Estimation de l'échappement en anguilles argentées (*Anguilla anguilla*) en France. Rapport 2015. Rapport technique, ONEMA-EPTB Vilaine, La Roche Bernard.
- Briand, C., Martins, M., et Langlo, S. 2017. Organisation et animation technique des journées techniques, monitoring anguille. Rapport technique, Institution d'Aménagement de la Vilaine, La Roche Bernard.
- Briand, C., Sauvaget, B., et Eriau, G. 2014. Suivi de la dévalaison en 2012-2013 sur la Vilaine. Rapport technique, Institution d'Aménagement de la Vilaine, La Roche Bernard.
- Briand, C., Sauvaget, B., et Eriau, G. 2015b. Suivi de la dévalaison en 2013-2014 sur la Vilaine à l'aide d'un didson. Rapport technique, EPTB Vilaine, La Roche Bernard.
- Briand, C., Sauvaget, B., et Eriau, G. 2016. Suivi de la dévalaison d'anguilles argentées en 2014-2015 (troisième année) sur la vilaine à l'aide d'un didson. Rapport technique, EPTB Vilaine, La Roche Bernard.
- Briand, C. et Woimant, S. 2015. Note sur le calcul des débits à Arzal. Rapport technique, Institution d'Aménagement de la Vilaine, La Roche Bernard.
- Briand, C., Sauvaget, B., et Eriau, G. 2019. Suivi de la dévalaison d'anguilles argentées en 2017-2018 (sixième année) sur la Vilaine à l'aide d'un DIDSON. Rapport technique, EPTB Vilaine.
- Conway, J., Eddelbuettel, D., Nishiyama, T., Prayaga, S.K., et Tiffin, N. 2013. RPostgreSQL : R interface to the PostgreSQL database system. R package version 0.4.
- Grothendieck, G. 2012. sqldf : Perform SQL Selects on R Data Frames. R package version 0.4-6.4.
- Jouanin, C., Briand, C., Beaulaton, L., et Lambert, P. 2012. Eel density analysis (EDA2.x) : un modèle statistique pour estimer l'échappement des anguilles argentées (*Anguilla anguilla*) dans un réseau hydrographique. Rapport technique, IRSTEA, Bordeaux, FRANCE.
- Langkau, M.C., Balk, H., Schmidt, M.B., et Borchering, J. 2012. Can acoustic shadows identify fish species ? a novel application of imaging sonar data. *Fisheries Management and Ecology* .
- Peng, R., Murdoch, D., Rowlingson, B., et A., M. 2013. gpclib : General Polygon Clipping Library for R. R package version 1.5-5.
- Zeileis, A., Meyer, D., et Hornik, K. 2007. Residual-based shadings for visualizing (conditional) independence. *Journal of Computational and Graphical Statistics* **16**(3) : 507–525.

Annexes

3.6 Détails concernant le positionnement du DIDSON et le comptage des anguilles

Un traitement des données de détection a été programmé pour donner une idée des détections à la descente (+) et à la montée (-). Les ouvertures de vannes sur les figures correspondent aux ouvertures moyennes lors des détections (elles sont pondérées par les effectifs en migration).

Période A

La période A correspond à la période avant la réparation de la fente de la chambre d'acquisition du didson.

Période B

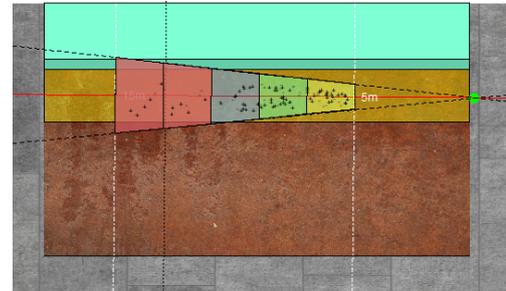
La période B début après la réparation de la fente de la chambre d'acquisition et s'arrête au premier février. Elle correspond à la première crue.

Période C

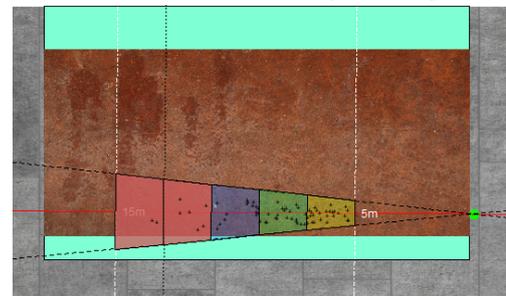
La période C correspond au mois de février, le didson est placé au fond et en surface à l'aide de l'automate qui suit le fonctionnement de la vanne. Il n'y a pas de détections lorsque l'écoulement est en surface et que le didson reste au fond. Un grand nombre de détections ($N'_{40}+=$, $N'_{40}-=$) sont effectuées au fond lors du principal pic de crue de l'hiver.

Période D

La période D correspond aux mois de mars et avril (après le 3 mars). Le didson est placé en surface il n'y a pas d'écoulement de vanne au fond. Les débits du barrage restent des débits de crue et les passages d'anguilles observés sur le volet 4 sont importants ($N'_{40}+=411$, $N'_{40}-=147$). Cette période correspond à la principale phase d'enregistrements : nombre de périodes $O_t=1644$ et les dépouillements correspondent à $O_{t\circ}=1095$ périodes de suivi.

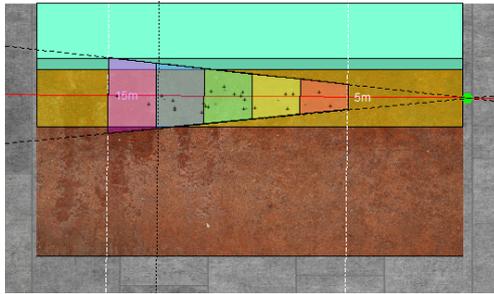


(a) $\Phi=$, $\beta=$, $h=$, $O_t=$, $O_{t\circ}=$, $N'_{40}+=$, $N'_{40}-=$, date=

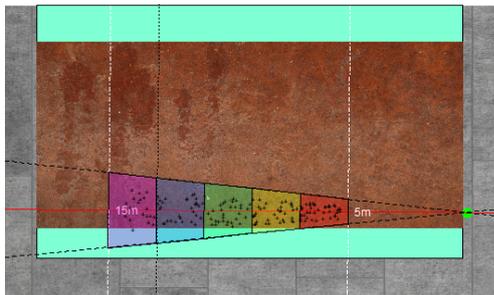


(b) $\Phi=$, $\beta=$, $h=$, $O_t=$, $O_{t\circ}=$, $N'_{40}+=$, $N'_{40}-=$, date=

FIGURE 45 – Enregistrements de la période A, utilisation de l'automate pour suivre la vanne et placer le didson au fond à -5.5m et en surface à 0m. Les deux fenêtres en rouge indiquent un problème probable de détection au delà de 11m. La distribution des anguilles dans le champ perpendiculaire à l'axe du DIDSON est générée aléatoirement, $\Phi=$ fonctionnement de la Vanne, β angle du DIDSON, $h=$ hauteur du DIDSON en côte orthométrique, $O_t=$ nombre de périodes de 30 minutes, $O_{t\circ}=$ nombre de périodes de 30 minutes ayant fait l'objet d'un dépouillement, $N'_{40}+=$ nombre d'anguilles observées en dévalaison, $N'_{40}-=$ nombre d'anguilles observées en montaison (nage dirigée vers l'amont). La hauteur de la vanne et la charge sur le volet correspondent à la moyenne des hauteurs observées pondérée par les effectifs en migration.

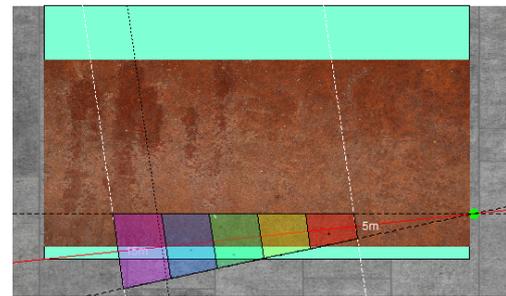


(a) $\Phi=$, $\beta=$, $h=$, $O_t=$, $O_{t\circ}=$, $N'_{4o+}=$, $N'_{4o-}=$, date=



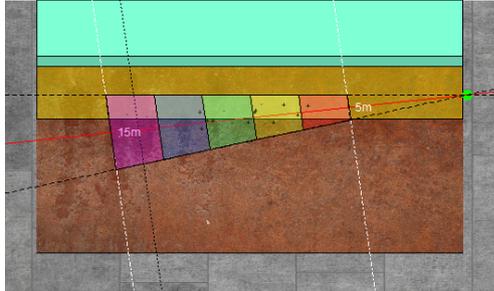
(b) $\Phi=$, $\beta=$, $h=$, $O_t=$, $O_{t\circ}=$, $N'_{4o+}=$, $N'_{4o-}=$, date=

FIGURE 46 – Enregistrements de la période B a partir du 13/12 réparation de la fente de la chambre d’acquisition, le didson alterne avec l’automate entre deux positions 0m et -5.5 m pour les vannes, la figure correspond aux périodes ou l’angle est de 0°. Le troisième enregistrements correspond à un positionnement par erreur plus haut dans la colonne d’eau. La distribution des anguilles dans le champ perpendiculaire à l’axe du DIDSON est générée aléatoirement, $\Phi=$ fonctionnement de la Vanne, β angle du DIDSON, $h=$ hauteur du DIDSON en côte orthométrique, $O_t=$ nombre de périodes de 30 minutes, $O_{t\circ}=\text{nombre de périodes de 30 minutes ayant fait l’objet d’un dépouillement}$, $N'_{4o+}=\text{nombre d’anguilles observées en dévalaison}$, $N'_{4o-}=\text{nombre d’anguilles observées en montaison (nage dirigée vers l’amont)}$. La hauteur de la vanne et la charge sur le volet correspondent à la moyenne des hauteurs observées pondérée par les effectifs en migration.

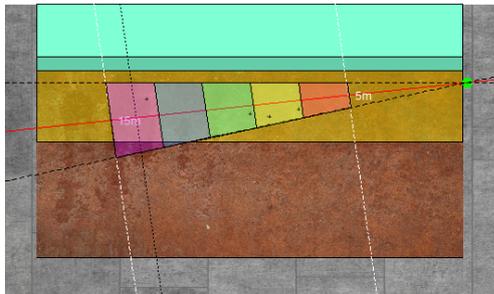


(a) $\Phi=f$, $\beta=-7$, $h=-5.5$, $O_t=37$, $O_{t\circ}=21$, $N'_{4o+}=1$, $N'_{4o-}=4$, date=01 janv. au 08 janv.

FIGURE 47 – Enregistrements de la période B, didson au fond angle - 7°. La distribution des anguilles dans le champ perpendiculaire à l’axe du DIDSON est générée aléatoirement, $\Phi=$ fonctionnement de la Vanne, β angle du DIDSON, $h=$ hauteur du DIDSON en côte orthométrique, $O_t=$ nombre de périodes de 30 minutes, $O_{t\circ}=\text{nombre de périodes de 30 minutes ayant fait l’objet d’un dépouillement}$, $N'_{4o+}=\text{nombre d’anguilles observées en dévalaison}$, $N'_{4o-}=\text{nombre d’anguilles observées en montaison (nage dirigée vers l’amont)}$. La hauteur de la vanne et la charge sur le volet correspondent à la moyenne des hauteurs observées pondérée par les effectifs en migration.

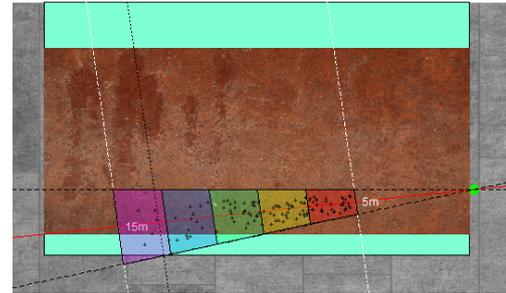


(a) $\Phi=s$, $\beta=-7$, $h=0$, $O_t=219$, $O_{t\circ}=188$, $N'_{4o+}=11$, $N'_{4o-}=9$, date=31 déc. au 08 janv.

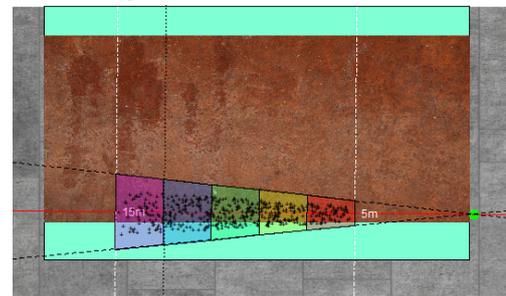


(b) $\Phi=s$, $\beta=-7$, $h=0.8$, $O_t=91$, $O_{t\circ}=51$, $N'_{4o+}=4$, $N'_{4o-}=1$, date=21 janv. au 24 janv.

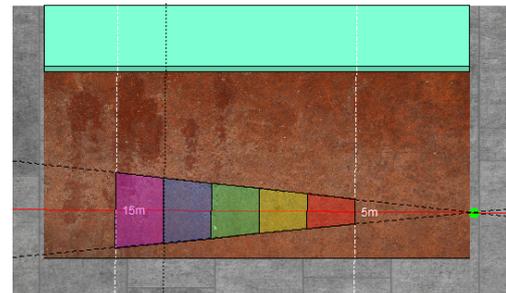
FIGURE 48 – Enregistrements de la période B, didson positionné en surface, angle -7° trois positions (0, 0.8 et 1 m). La distribution des anguilles dans le champ perpendiculaire à l'axe du DIDSON est générée aléatoirement, $\Phi=$ fonctionnement de la Vanne, β angle du DIDSON, $h=$ hauteur du DIDSON en côte orthométrique, $O_t=$ nombre de périodes de 30 minutes, $O_{t\circ}=$ nombre de périodes de 30 minutes ayant fait l'objet d'un dépouillement, $N'_{4o+}=$ nombre d'anguilles observées en dévalaison, $N'_{4o-}=$ nombre d'anguilles observées en montaison (nage dirigée vers l'amont). La hauteur de la vanne et la charge sur le volet correspondent à la moyenne des hauteurs observées pondérée par les effectifs en migration.



(a) $\Phi=f$, $\beta=-7$, $h=-4.5$, $O_t=113$, $O_{t\circ}=101$, $N'_{4o+}=119$, $N'_{4o-}=0$, date=27 janv. au 04 févr.

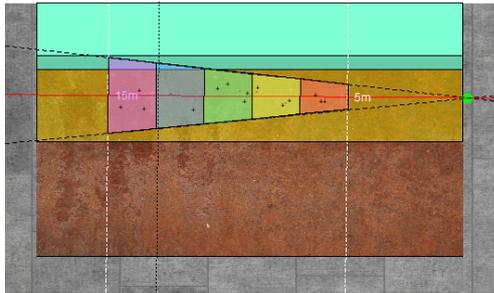


(b) $\Phi=$, $\beta=$, $h=$, $O_t=$, $O_{t\circ}=$, $N'_{4o+}=$, $N'_{4o-}=$, date=

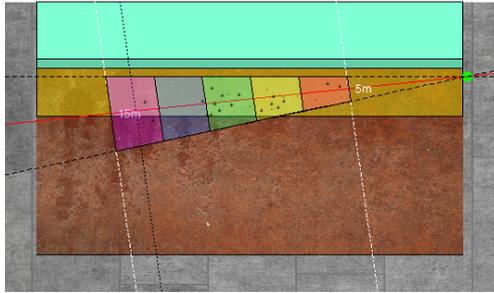


(c) $\Phi=$, $\beta=$, $h=$, $O_t=$, $O_{t\circ}=$, $N'_{4o+}=$, $N'_{4o-}=$, date=

FIGURE 49 – Enregistrements de la période C, didson au fond, écoulements en surface ou au fond. $h=$ hauteur du DIDSON en côte orthométrique, $O_t=$ nombre de périodes de 30 minutes, $O_{t\circ}=$ nombre de périodes de 30 minutes ayant fait l'objet d'un dépouillement, $N'_{4o+}=$ nombre d'anguilles observées en dévalaison, $N'_{4o-}=$ nombre d'anguilles observées en montaison (nage dirigée vers l'amont). La hauteur de la vanne et la charge sur le volet correspondent à la moyenne des hauteurs observées pondérée par les effectifs en migration.

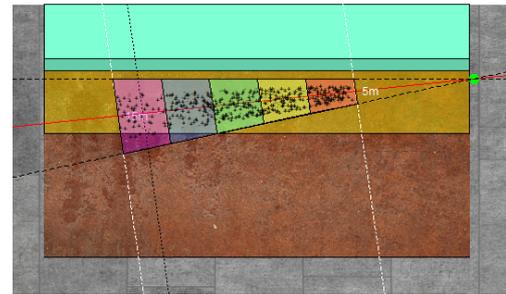


(a) $\Phi=$, $\beta=$, $h=$, $O_t=$, $O_{t\circ}=$, $N'_{4o}+=$, $N'_{4o}-=$, date=



(b) $\Phi=s$, $\beta=-7$, $h=1$, $O_t=207$, $O_{t\circ}=153$, $N'_{4o}+=18$, $N'_{4o}-=12$, date=24 janv. au 01 mars

FIGURE 50 – Enregistrements de la période C, didson en surface, écoulements en surface. h = hauteur du DIDSON en côte orthométrique, O_t = nombre de périodes de 30 minutes, $O_{t\circ}$ =nombre de périodes de 30 minutes ayant fait l'objet d'un dépouillement, $N'_{4o}+=$ nombre d'anguilles observées en dévalaison, $N'_{4o}-=$ nombre d'anguilles observées en montaison (nage dirigée vers l'amont). La hauteur de la vanne et la charge sur le volet correspondent à la moyenne des hauteurs observées pondérée par les effectifs en migration.



(a) $\Phi=s$, $\beta=-7$, $h=1$, $O_t=1644$, $O_{t\circ}=1095$, $N'_{4o}+=411$, $N'_{4o}-=147$, date=01 mars au 30 avr.

FIGURE 51 – Enregistrements de la période D, écoulement en surface, h = hauteur du DIDSON en côte orthométrique, O_t = nombre de périodes de 30 minutes, $O_{t\circ}$ =nombre de périodes de 30 minutes ayant fait l'objet d'un dépouillement, $N'_{4o}+=$ nombre d'anguilles observées en dévalaison, $N'_{4o}-=$ nombre d'anguilles observées en montaison (nage dirigée vers l'amont). La hauteur de la vanne et la charge sur le volet correspondent à la moyenne des hauteurs observées pondérée par les effectifs en migration.

4 Notations

τ	Tailles d'anguilles, <45cm mâles, 45-60cm petites femelles, 60-80cm grandes femelles, >80cm très grandes femelles	$Q_4(t)$	Débit total de la vanne 4 au temps t
δ	Classes de distance au sonar (2,5m[, (5,7m[, (7,9m[, (9,11m[, (11,13m[et (13,15m[$Q(t)$	Débit total de la Vilaine au temps t
β	Angle du DIDSON	$S(k, \delta)$	Surface couverte par le faisceau à la distance δ pour la position k
Φ	Type d'écoulement du barrage , s surface, f =fond	$S(k)$	Surface couverte par le faisceau pour la position k
O_t	Période d'enregistrement de 30 mn	$D(t)$	Profondeur de la colonne d'eau en amont
O_{t^o}	Période d'enregistrement de 30 mn avec visualisation	$C(t)$	Charge d'eau sur le volet en surface
h	Altitude du DIDSON en IGN69	$F(t, k, \Lambda, \lambda)$	Fonction de répartition verticale des anguilles
$N'_{4o}(t, \tau, \delta, k)$	Dévalaison observée dans le champ de détection du DIDSON sur la vanne 4	l	Largeur de la vanne
$N_{4o}(t, \tau, \delta, k)$	Dévalaison réelle dans le champ de détection du DIDSON sur la vanne 4, c'est à dire corrigée des problèmes d'efficacité de détection	$E(\widehat{\delta, \tau, k})$	Efficacité du DIDSON calculée par un glm
$N_4(t, \tau)$	Dévalaison sur l'ensemble de la vanne 4	\bar{E}_k	Efficacité moyenne du DIDSON pour chaque position k
$N(t, \tau)$	Dévalaison au pas de temps t pour la classe de taille τ	ρ_k	Facteur de correction des effectifs pour tenir compte de la minute perdue par demie-heure lorsque le rotateur est actionné
		μ	Pourcentage d'anguilles migrant de jour
		Λ	Coefficient donnant le rapport entre la hauteur de la fenêtre de migration au droit du DIDSON et la hauteur de la vanne
		λ	Coefficient donnant le rapport entre la hauteur de la fenêtre de migration au droit du DIDSON et la charge (hauteur d'eau) sur le volet
		$\hat{P}(N)$	Effectifs modélisés
		\odot	Période de suivi complet sans problème de qualité
		\otimes	Période de suivi extrapolée, problème d'enregistrement ou de qualité
		\oslash	Périodes sans problème de qualité mais avec un mauvais positionnement du DIDSON (les périodes \oslash sont incluses dans \otimes)
		\oplus	Période sans donnée pendant laquelle les effectifs sont extrapolés à partir des données des jours voisins.

Rapport L^AT_EX

version 1 : correction des 3 silures dans les effectifs.

Dernière compilation le 20 mai 2020

version R 3.6.1

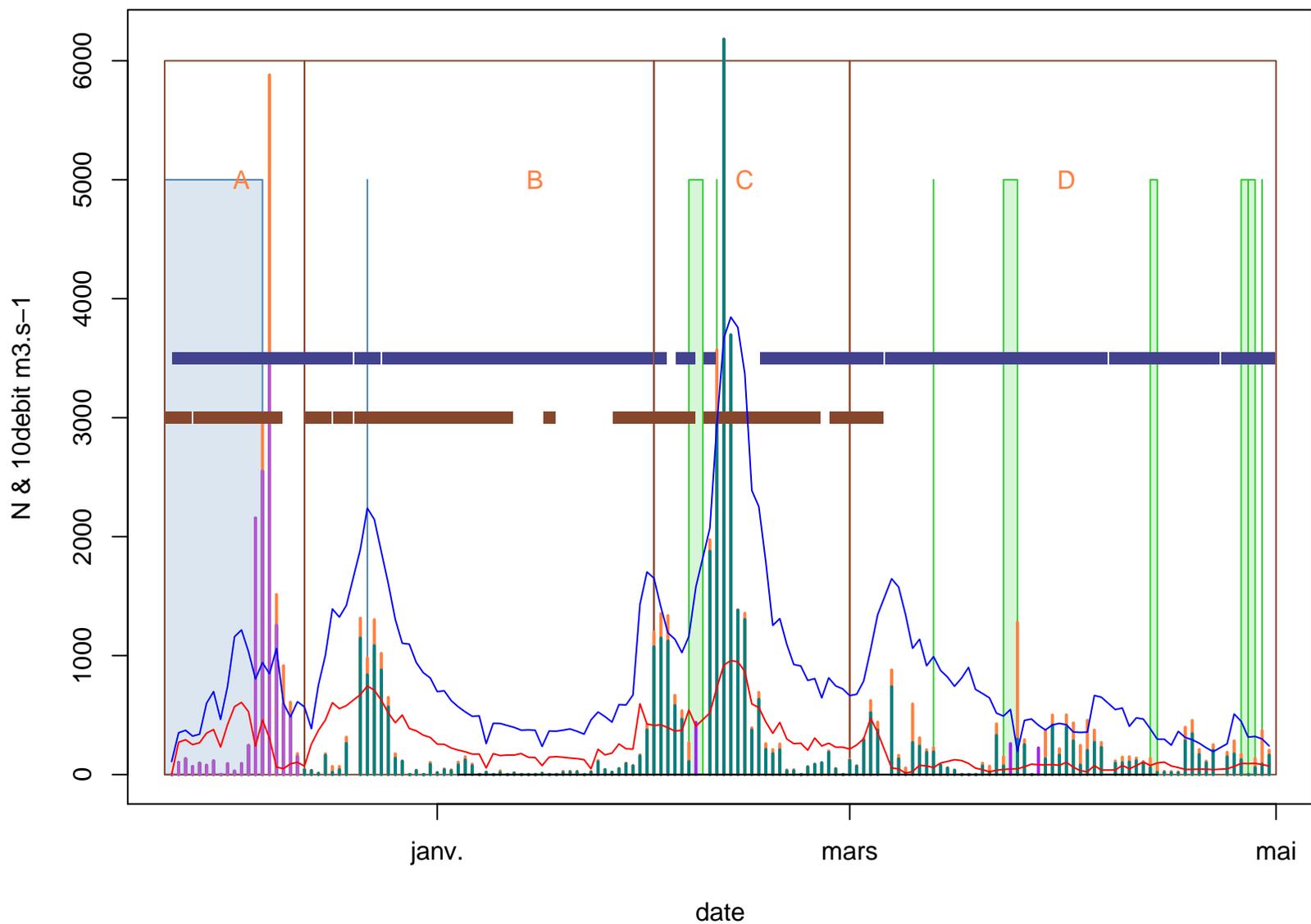


FIGURE 52 – Effectifs journaliers estimés sur l’ensemble du barrage, en bleu (N) \odot \blacksquare = effectifs mesurés, en orange N \otimes \blacksquare = effectifs extrapolés à partir de données de densité recueillies dans la journée. En mauve, N \oplus \blacksquare effectifs extrapolés à partir des données des jours voisins. En bleu —, débits journaliers estimés au barrage d’Arzal $m3.s^{-1}$ (multipliés par 10 pour des raisons graphiques). En rouge, —, débits de la vanne 4. Les barres en bleu et marron indiquent la position verticale du didson