



VOILET POISSONS MIGRATEURS 2015-2021

Suivi de la dévalaison d'anguilles argentées en 2020-2021 (neuvième 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)



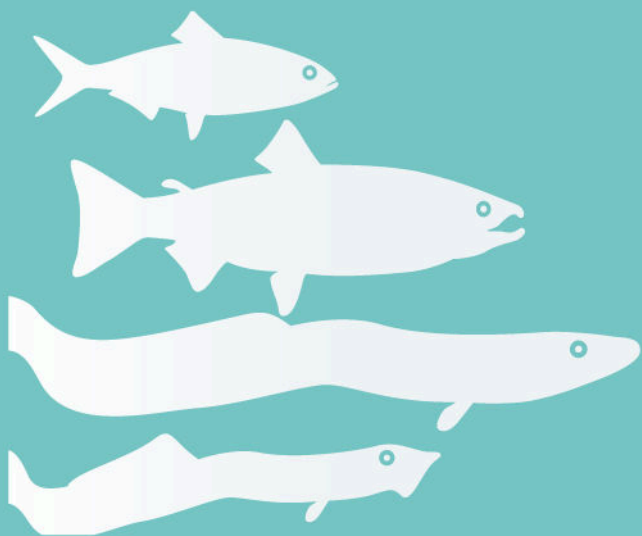
Truite de mer (© A. Langlois, Syndicat Horn)



Date d'édition :

Mars 2022

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 sur la Vilaine à l'aide d'un didson

en 2020–2021 (9ème année)

Cédric Briand, Brice Sauvaget, Gérard Eriau

Résumé

Les dévalaisons d'anguilles argentées ont été suivies, pour la neuvième année consécutive, à l'aide d'un sonar multifaisceaux (didson). Le didson est 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. Sur les neuf années, 18 961 anguilles argentées ont été comptées lors des dépouillements. En 2020-2021, 1 985 anguilles ont été comptées. 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. Les effectifs migrants sont calculés en extrapolant à l'ensemble de la vanne le pourcentage de surface de suivi par le sonar, puis en utilisant le ratio des débits de la vanne 4 aux autres vannes. 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=1 523), ont été extrapolés à l'ensemble des vannes (N=49 835). Lorsque le didson est mal placé, les effectifs sont estimés à partir des densités du jour même (N=9 284). Un modèle calé sur l'ensemble des journées de suivi a été calé pour estimer les effectifs lorsque le didson n'était pas en mesure d'apporter une estimation journalière des effectifs (N=2 131). L'estimation quantitative de la dévalaison sur la Vilaine, sur la période de suivi, s'établit à (N=52 199) soit 20.1 tonnes. Les tendances interannuelles de cette migration sont détaillées dans le rapport (baisse, puis possible augmentation).

Mots clés : anguille argentée migration dévalaison didson Vilaine.

Abstract

Silver eel migrations were monitored, for the ninth year in a row, using a multibeam sonar (didson). The didson is placed on a guiding rail at the level of the fourth sluice gate of the Arzal dam at the limit of the Vilaine estuary. Over nine years, 18 961 silver eels were counted during the readings. In 2020-2021, 1 985 eels have been counted. The effectiveness of the detection was calculated according to the size of the eels, the position of the didson and distance to the didson. To extrapolate the numbers of silver eel to the entire dam, the percentage of gate area monitored by sonar, and the ratio of the flow rates from gate 4 to other gates were used. Numbers monitored for the correct setting, i.e. when the didson is well positioned in relation to the flows, at the surface and at the bottom on the gate (N = 1 523), have been extrapolated to all gates (N = 49 835). When the didson is in the wrong position, numbers are estimated from densities of the same day (N = 9 284). A model based on all days of monitoring was calibrated to estimate the numbers when the didson was not capable of providing a daily estimate of the migration (N = 2 131). A quantitative estimation of downstream migration on the Vilaine, over the monitoring period is established at (N = 52 199) or 20.1 tonnes. The interannual trends of this migration are detailed in the report (decrease, then possible increase).

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	7
1.8	Traitements	9
1.8.1	Efficacité de la détection	9
1.8.2	Migration sur l'ensemble de la vanne	11
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	12
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	14
2.1.4	Positionnement du didson	15
2.1.5	Qualité des images	16
2.2	Taille des anguilles et efficacité	17
2.2.1	Calcul de l'efficacité	17
2.3	Migration	18
2.3.1	Migration en fonction du cycle nyctéméral	18
2.3.2	Comportement de migration	18
2.3.3	Biomasses et sexe ratios	20
2.3.4	Estimation des effectifs migrants	20
2.3.5	Prédiction pour les données manquantes	21
3	Discussion	21
3.1	Migration	21
3.2	Biais et précision	22
3.2.1	Confusion avec d'autres espèces	22
3.2.2	Taille des anguilles	22
3.2.3	Efficacité moyenne	23
3.3	Synthèse inter-annuelle	23
4	Annexes	25
4.1	Comptage par positions	25
4.2	Notations	28
4.3	Tableaux	29

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 (JOUANIN et al., 2012; BRIAND, BEAULATON et al., 2015). 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, MARTINS et LANGLO, 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 de la vanne 4 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

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 la fin de l'été principalement sous l'effet des augmentations de débit.

se fait sur une section plus large, voire sur d'autres portes, la section relative observée par 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 propose le recalcul de l'ensemble des migrations depuis le début du suivi, et fait en particulière la synthèse des résultats 2020-2021. Les résultats sont comparés aux résultats des saisons 2012-2013, 2013-2014, 2014-2015 2015-2016, 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 et 2019-2020) (BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2014; BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2015; BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2016; BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2018a; BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2018b; BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2019; BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2021).]

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).

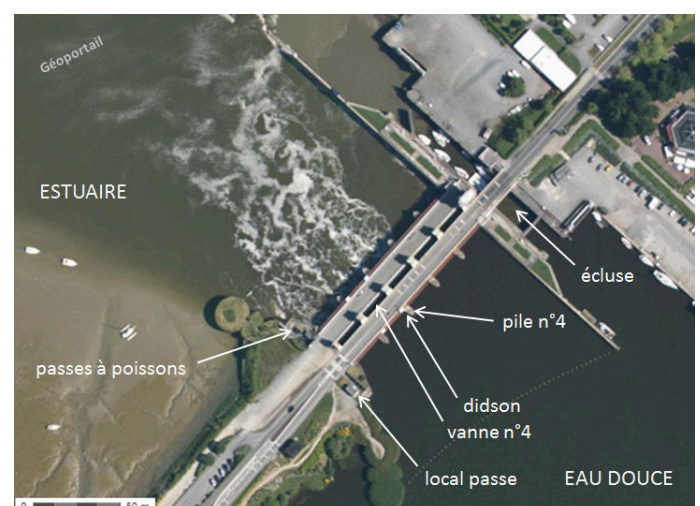


FIGURE 1 – Vue aérienne du barrage d'Arzal, montrant en rive droite l'écluse et le pertuis des vannes.

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.

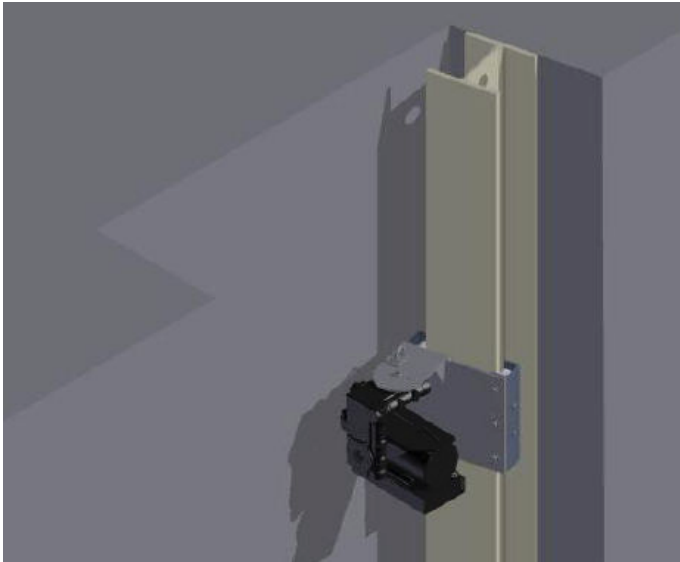


FIGURE 3 – Positionnement du didson dans l'échancrure de batardage de la vanne. Le didson est placé à l'abri des corps dérivants.

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 V5.27.48 de la société Soundmetrics.



FIGURE 4 – Le didson en 2017.

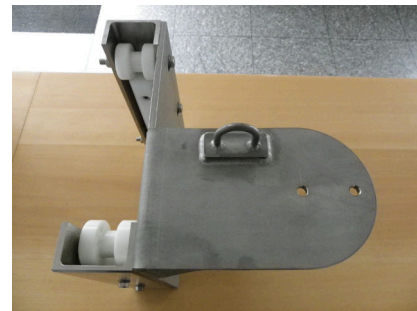


FIGURE 5 – Chariot du didson.

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 6 et 8). 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 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



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

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 -7° 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 25). 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.

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

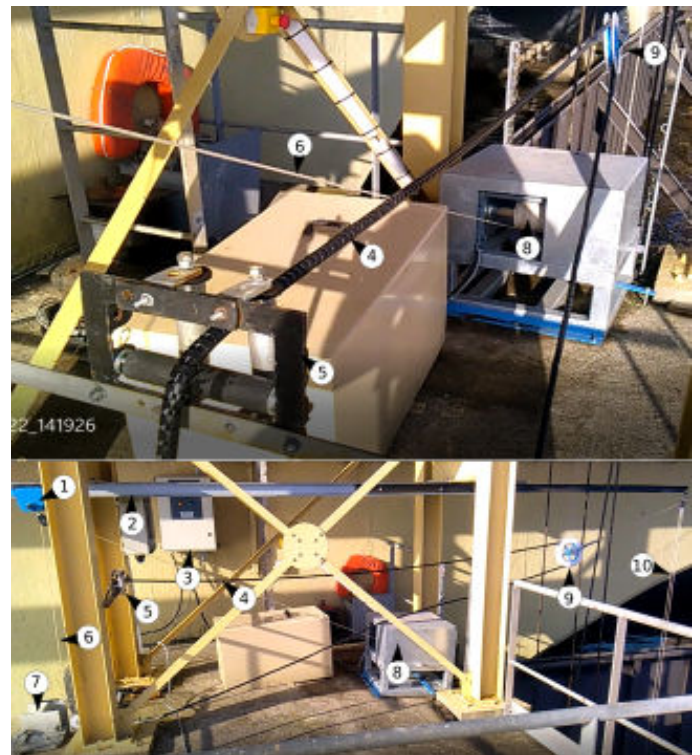


FIGURE 7 – Automatisation de la position verticale du didson. 1 chariot sur poutre HEB, 2 rail, 3 coffret électrique comprenant les éléments de contrôle de l'automate, 4 câble du didson (alimentation et signal) renforcé par une gaine, 5 guide câble, 6 câble de traction du didson, 7 poutre HEB du chariot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

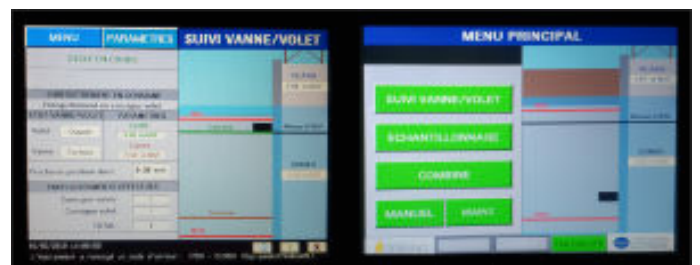


FIGURE 8 – Ecrans de contrôle et de programmation de la position du didson

crue d'ampleur moyenne, pendant lesquels 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 du concentrateur de faisceau (slit) a dégradé la qualité des images à partir de fin janvier.

En 2018–2019 l'essentiel de la saison est couvert par le mode "suivi vanne volet" qui permet de positionner correctement le didson en cours de nuit lorsque la gestion du barrage alterne entre vannes en volets.

En 2019–2020, la saison s'effectue avec un suivi principalement en vannes dès le début de la saison. Le suivi a été arrêté le 19/02 après que le câble ait été entaillé par un objet dérivant qui a mis fin au suivi (Figure 37). Cette situation intervient cependant après plusieurs pics de crue et il est probable que l'essentiel de la migration ait eu lieu.

En 2020–2021 le didson est remis en place le 02/10 après répartition du câble. Jusqu'au 12/12 une succession de problèmes techniques sont réglés, plantage lié à l'humidité, arrêts électriques à répétition sur l'ouvrage, plantage de la mémoire vive du PC d'acquisition, problème de codeur et de fin de course sur le volet, difficultés à mettre en service l'automatisme de suivi vanne volets... Les arrêts de fin novembre correspondent de nouveau à des coupures électriques du barrage. Le didson fonctionne globalement plutôt bien sur le reste de la saison. Il est enlevé de l'eau lors du deuxième pic de crue le 03/02, les effectifs observés sont faibles (et il ne s'agit pas d'un problème d'efficacité) et les risques d'avarie sont importants. Il ne sera remis en place que le 01/03 un peu après la fin de la crue. Dans tous les cas sur les derniers jours de février, une pièce défectueuse sur la centrale 4 empêche le fonctionnement en vannes, et les écoulements sur le pertuis 4 s'effectuent en volets alors que les deux vannes alentour, 3 et 5 fonctionnent en vannes. Les dépouillements s'arrêtent le 30/04.

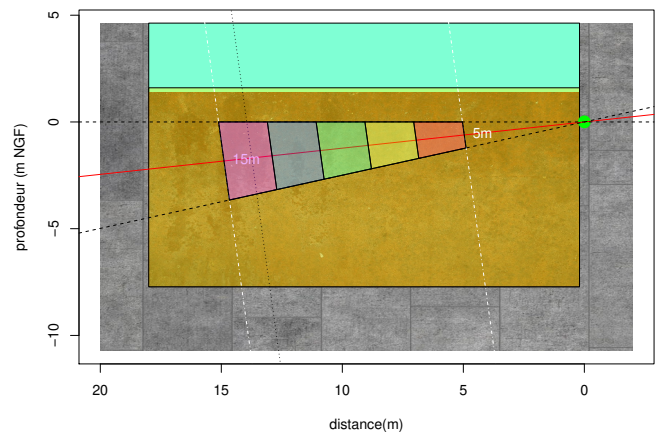


FIGURE 9 – Schéma montrant la position du didson et la fenêtre d'échantillonnage couverte par l'appareil lorsque celui-ci est placé 1 m sous la surface (-7°) pour détecter les anguilles migrant sur le volet. Les polygones de couleur représentent les différentes sections d'échantillonnage en fonction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

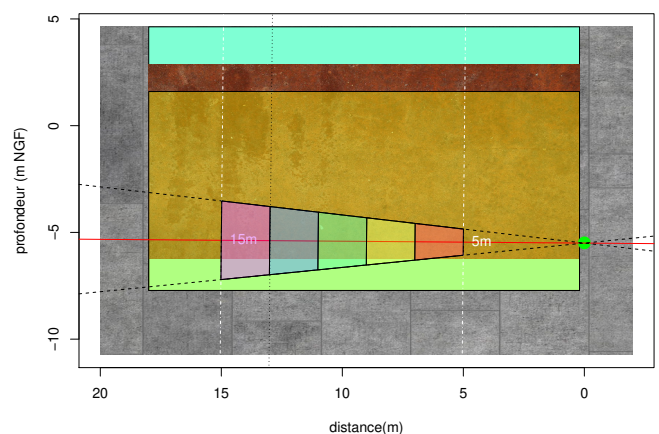


FIGURE 10 – Fond 0° 5-15m, didson placé à 5.5 m de profondeur lorsqu'il alterne entre des positions au fond et en surface à l'aide du positionnement géré par l'automate. Le didson échantillonne 14.8% de la fenêtre de passage supposée.

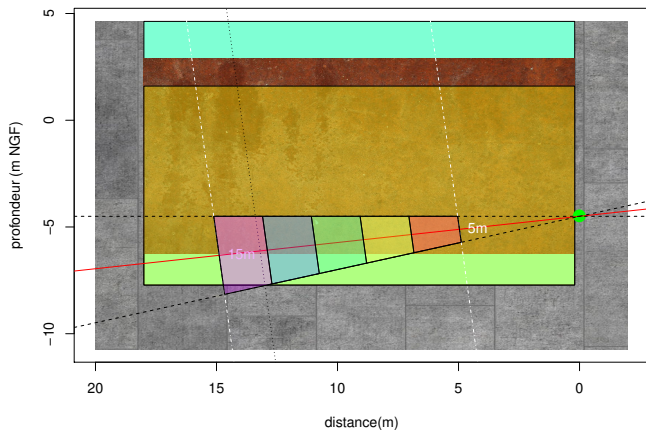


FIGURE 11 – Fond -7° 5-15m, Didson placé à 4.5 m de profondeur avec un angle de -7° . Par rapport à la position en Figure 10 le didson est remonté. L'angle de -7° permet d'éviter les échos sur la surface lorsque le didson est remonté en position haute par l'automate. Le didson échantillonne (14.6% de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

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.

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, où les formules de débit en écoulement libres conduisaient à sous-estimer les 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).

Les débits de 2020-2021 ont été ré-ajustés pour les écoulements libres et un coefficient de 1.4 a été utilisé en place du coefficient de 3.34 pour palier aux dérives de capteurs de niveau du barrage correction temporaire, travail en cours sur les formules de débit, pour expliquer et corriger ce biais. (Figure 12).

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).

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 traitement (CSOT) retire les éléments stables de l'image (échos constants) et ne retient que des poissons des objets, voire rien en période de fort débit et forte turbidité. Ce processus permet de réduire la taille

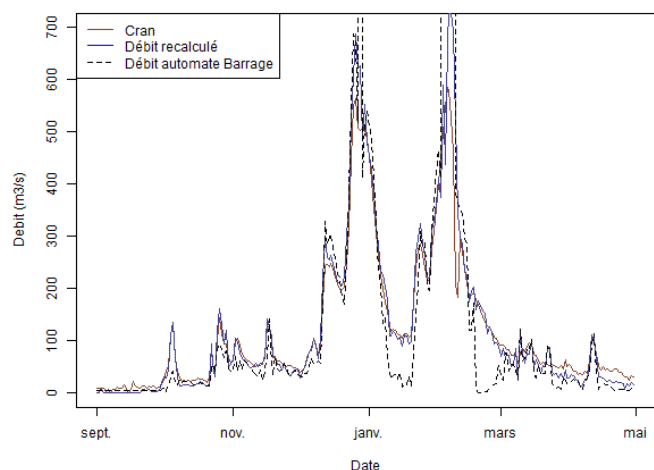


FIGURE 12 – Débits recalculés 2021. Comparaison des débits mesurés au niveau de la station de Rieux (Pont de Cran - station hydrométrique), des débits calculés par l'automate du barrage d'Arzal et des débits recalculés par la méthode de BRIAND et WOIMANT (2015). La saison de suivi s'étend de septembre 2020 à avril 2021.

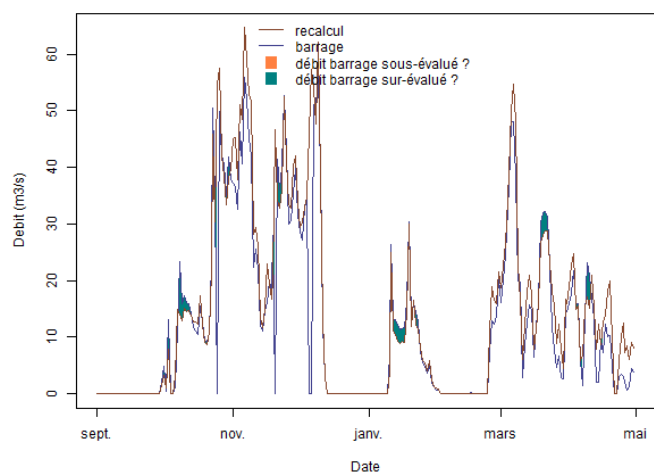


FIGURE 13 – Comparaison des valeurs produites par l'automate du barrage et des valeurs obtenues après correction de la dérive des codeurs. Les formules de débits des volets ont été recalées mais donnent à peu de choses près les mêmes débits avec des formules de débit différentes (BRIAND et WOIMANT, 2015).

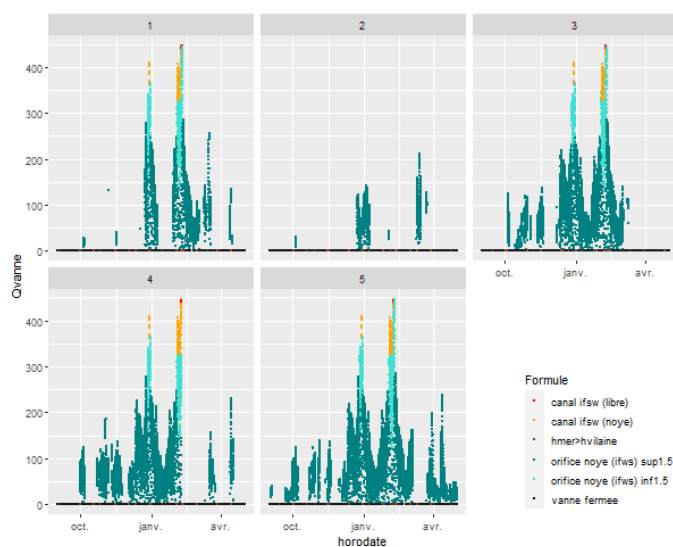


FIGURE 14 – Débits de chacun des pertuis de vanne pour l'hiver 2020–2021 en fonction des différents types d'écoulements calculés sur chaque vanne BRIAND et WOIMANT (2015).

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 2.5 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 opérateurs renseignent également l'entrée et la sortie des anguilles du champ. La zone d'écho du sonar se présente comme un cône (Figure 16). 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 :

- <-> l'anguille traverse l'ensemble du champ horizontal prospecté par le didson (elle traverse le faisceau d'un bord à l'autre (Figure 16)),
- *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 (GROTHENDIECK, 2017; CONWAY et al., 2021).

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 quadrilatères situés à des distances croissantes 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. Les données sont séparées par saison de suivi de 2012-2013 à 2020-2021.

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

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

Les positions du didson au cours des différentes années de suivi peuvent se résumer à 4 configurations,

sl correspond à un appareil penché pour essayer d'évaluer le positionnement vertical des anguilles dans la lame d'eau.

$$\text{Position } (k) = \begin{cases} f_5 \text{ fond, 5-15m} \\ f_3 \text{ fond, 3-12m} \\ s \text{ surface, 5-15m} \\ sl \text{ fond et surface, 3-12m} \end{cases} \quad (3)$$

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).

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

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 chaque saison et pour chaque position du didson sert de base au calcul.

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

Si l'efficacité était 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).

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

Les surfaces des polygones sont calculées par l'intersection de droites (MURDOCH et MURTA, 2020) (Figures 9). D'une classe de taille à la suivante, les nombres observés devraient théoriquement augmenter en cohérence avec les rapports de surface. Ainsi, cette augmentation devrait être linéaire, sauf lorsque le faisceau heurte le fond, car alors une partie de la zone de détection est perdue (cas pour les premières années de suivi).

En effet, d'après 4 et 5, on a (formule 6) :

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

En pratique, les effectifs n'augmentent pas avec la surface de détection, et la diminution dépend de la classe de taille. Les rapports des effectifs corrigés de la taille du faisceau servent de base au calcul de l'efficacité (hypothèse 1, Figure 15)

En prenant comme référence $E=1$ pour les classes de distance où les détections sont maximales, on pourrait calculer l'efficacité pour chacune des classes de taille en fonction de la distance de détection. Cette approche a été utilisée jusqu'en 2019-2020. Le problème est que pour chaque classe de taille, la classe de distance pour laquelle il y a le plus d'anguilles dans les effectifs corrigés se voit attribuer la note de 1. Or un examen des qualités de détection montre clairement un contraste entre les positions $k =$ volet ou vannes et en fonction des classes de distance au didson et de la taille (Figure 27). Les distances au didson sont déjà prises en compte dans le calcul des efficacités, il reste donc à prendre en compte la diminution des efficacités en fonction de la position et de la taille. L'idée est que la proportion d'anguilles douteuses (et donc écartées des comptages) est proportionnelle à la proportion d'anguille de bonne qualité observée pour les deux positions k , et pour les différentes classes de taille δ (hypothèse 3, Figure 15) A partir de 2019-2020, au lieu d'attribuer 1 comme maximum de classe on attribue la valeur q qui est le rapport entre le pourcentage d'anguilles de bonne qualité (4 ou 5) dans la classe de observée et la classe de référence : $\tau \Rightarrow 80cm, k = surface$. En outre, les données sont analysées sur les détections de toutes les saisons (Figures 27b, 27c).

On fait l'hypothèse que pour la classe de distance la plus favorable et pour la position volets, toutes les anguilles sont détectées (efficacité 1). Cette hypothèse est probablement juste car il n'y a que des anguilles de bonne qualité (>2) pour les deux distances les plus proches du didson dans la classe de taille $>80cm$.

Ces données sont ensuite utilisées pour calculer les efficacités moyennes par un modèle linéaire, pour lequel b_0, b_1, \dots, b_6 sont les coefficients de la régression. La distance, la position, la saison (avec une sé-

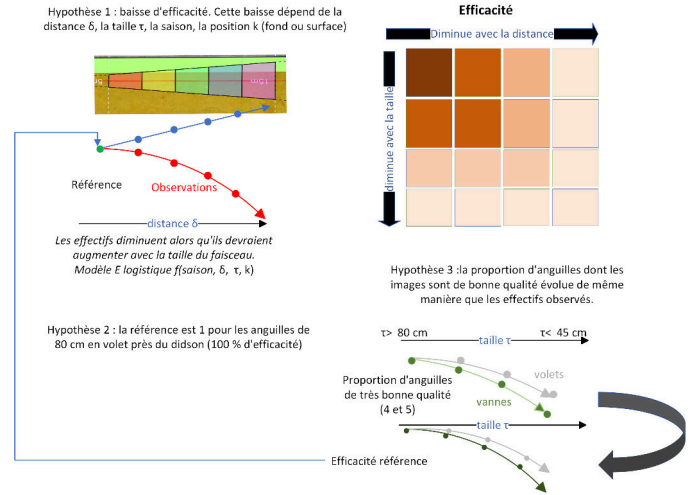


FIGURE 15 – Diagramme schématisé du calcul de l'efficacité.

paration pour les deux premières saisons en fonction de la position de départ à 3 ou 5 m) Les interactions entre la distance et la position $\delta : k$ et entre la taille et la position $\tau : k$ et avec la saison de suivi sont testées. La prédiction du modèle peut conduire à des efficacités supérieures à 1, qui sont alors ramenées à 1 (formule 7).

$$E(\delta, \tau, k) = \min(1, b_0 + b_1\tau + b_2\delta + b_3k + b_4\delta : k + b_5\tau : k + b_6saison) \quad (7)$$

L'efficacité pour chaque position du didson \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 $\rho(k) = 1$.

$$E(k) = E(\delta, \tau, k) \quad (9)$$

$$N'_{o4}(t, k) = N_{o4}(t, k) \times E(k) \times \rho(k)$$

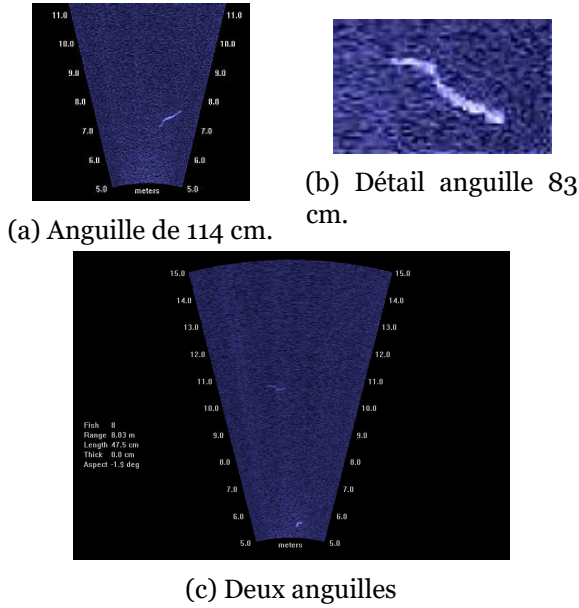


FIGURE 16 – Anguilles en dévalaison filmées par le didson.

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, SAUVAGET et ERIAU, 2015). Compte tenu de cette observation, il a été nécessaire d'étendre la hauteur de migration qui lors de la première année n'avait été considérée que comme étant de deux fois la hauteur d'ouverture de la vanne. Nous faisons l'hypothèse que les anguilles migrent 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 affectées 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 toutes les 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).

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

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

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 différents pertuis se fait au *prorata* 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

En 2020-2021 le dépouillement des fichiers a débuté le 04/10 avec un problème de qualité des images 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 OFB et EPTB-Vilaine).

2 Résultats

2.1 Suivi

2.1.1 Fonctionnement du barrage

Le barrage a connu quelques ouvertures nocturnes avant la mise en place du didson le 02 octobre (Figures 17 et 18). Les premiers pics de crue (débit supérieur à $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) interviennent très tôt dans la saison. Comme la saison 2019–2020, la saison 2020–2021 est marquée un débit de grande crue $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Les turbidités montent au-delà de 50 NTU au cours du premier pic de crue (Figure 17).

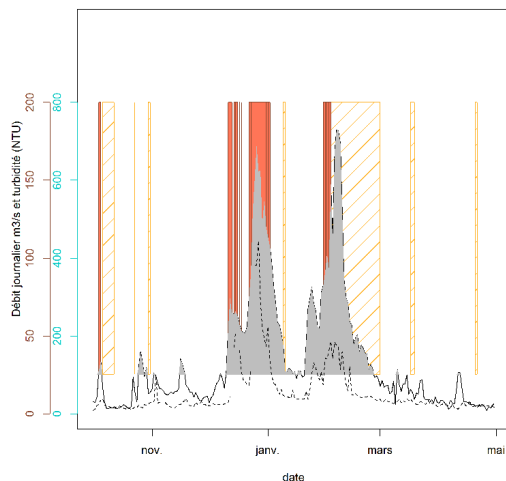


FIGURE 17 – Débit de la Vilaine ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ —) et turbidité (NTU, - - -) pendant la période de migration. En ■ débits corrigés (moyennes journalières). En fond, problèmes de fonctionnement du sonar, en jaune ■ erreurs ponctuelles d'acquisition, en orange, ■ problèmes de qualité, voir aussi la figure 36 dans la discussion pour le détail des horaires.

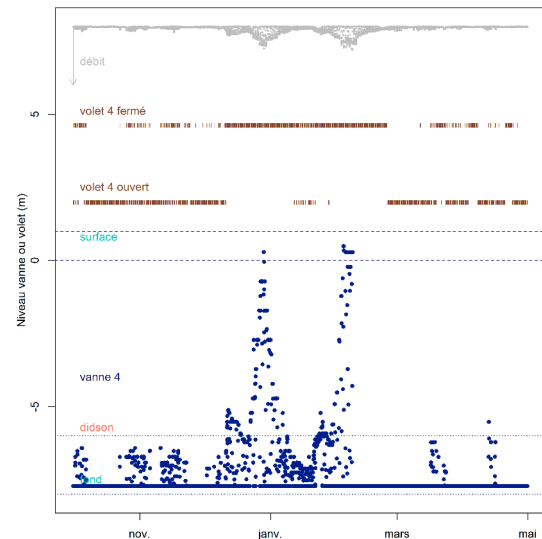


FIGURE 18 – Fonctionnement du barrage, ouverture de la vanne 4 et du volet 4 et débit de la Vilaine pendant la période de migration. Chaque point correspond à une valeur pendant 30 minutes.

2.1.2 Dépouillement des fichiers

Le dépouillement correspond à du temps de lecture de fichier (Figure 19), 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 n'est que de l'ordre de 7 jours contre 15 jours pour la saison précédente (2019-2020), et un mois pour 2018-2019 (Tableau 1). Ce temps plus limité est lié en partie à l'enlèvement du didson de l'eau en février.

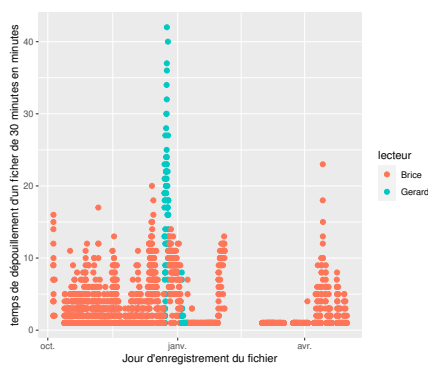
TABLEAU 1 – Temps de dépouillement des fichiers didson en 2020-2021. Les temps donnés ne correspondent qu'au temps passé au dépouillement.

mois	temps
10	20 :48 :00
11	1 jour 04 :09 :00
12	3 jours 03 :11 :00
1	17 :43 :00
2	05 :46 :00
3	08 :14 :00
4	14 :26 :00
total	7 jours 02 :17 :00

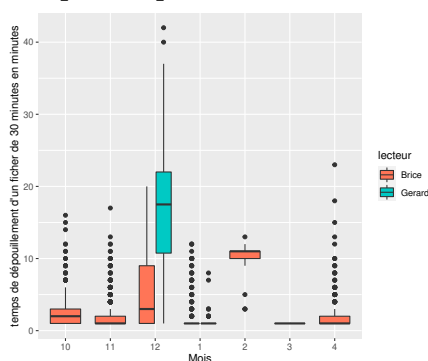
On retrouve des temps de dépouillement dépassant 30 minutes lors des pics de migration, la mesure des anguilles restant chronophage (Figure 19a). Cette année comme les autres, les fichiers ont

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. Les présences gênantes d'alevins et de mulets peuvent exister en début de saison en octobre et novembre, sans toutefois constituer un facteur limitant pour le comptage. Ils disparaissent en hiver avant de réapparaître en mars (Figures 20, 21).



(a) Temps de dépouillement en 2020-2021.



(b) BoxPlot des temps de dépouillement en 2020-2021.

FIGURE 19 – Temps de dépouillement, distribution et boxplot.

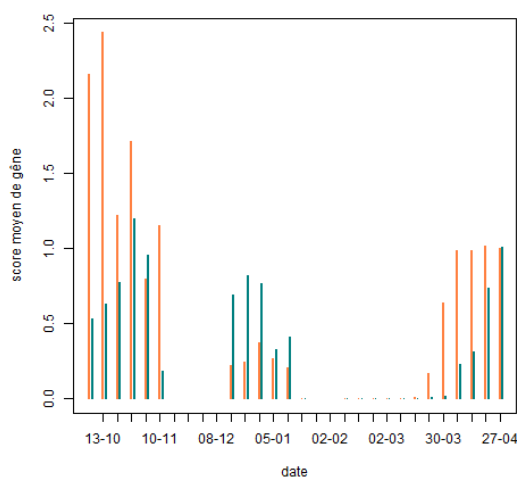


FIGURE 20 – Histogramme montrant la présence de mulets (—) et d'alevins (—) dans les comptages, les valeurs sont agrégées sous forme de moyenne à partir de scores allant de 0 (pas de poissons) à 5 (poissons très gênants pour le comptage).

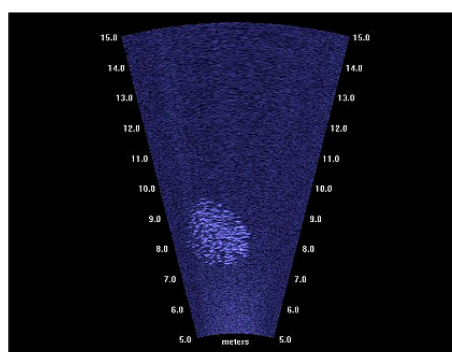


FIGURE 21 – Banc d'alevins le 24 avril 2015.

Les mulets sont plus gênants que les alevins, avec une lecture difficile dès que le score dépasse 2, ce

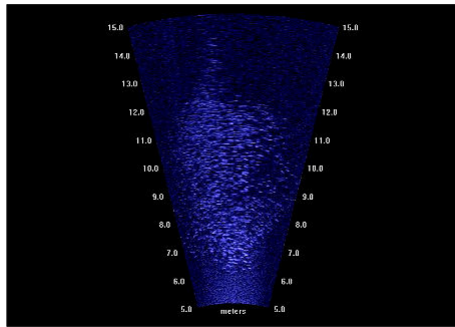


FIGURE 22 – Banc d’alevins le 26 avril 2015.

qui n’est arrivé qu’en octobre cette année. Les muets ont toutefois une activité diurne et la gêne est en général concentrée en début et fin de nuit.

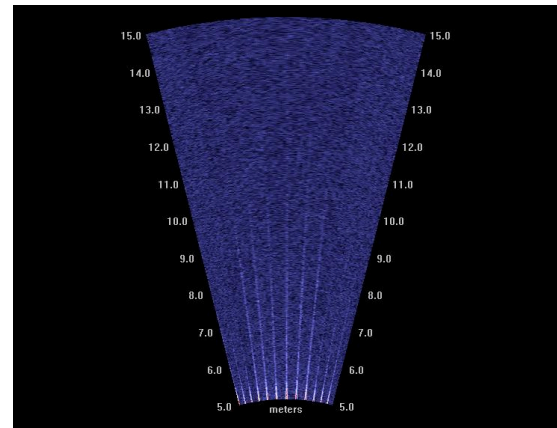


FIGURE 24 – Flash du didson

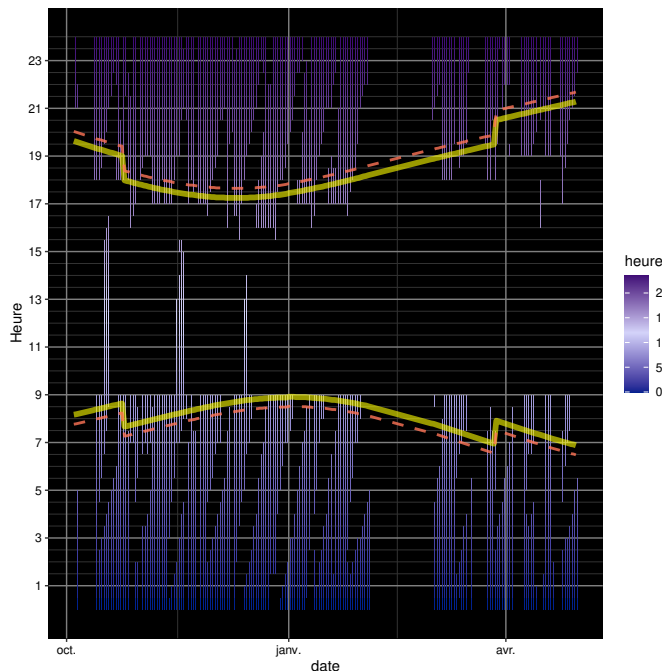


FIGURE 23 – Heures de début et de fin des fichiers dépouillés, et heures de lever et de coucher du soleil (en jaune). Les rectangles bleus à violet correspondent à des horaires de fichiers dépouillés, en noir pas de dépouillement, en orange début et fin des durées de pénombre civiles correspondant à une position du soleil à -6° en dessous de l’horizon.

2.1.3 Problèmes dans le suivi

L’ensemble des problèmes techniques sont résumés sur les Figures 17, 36 pour le détail par 30 minutes, et 54 pour le graphique saisonnier.

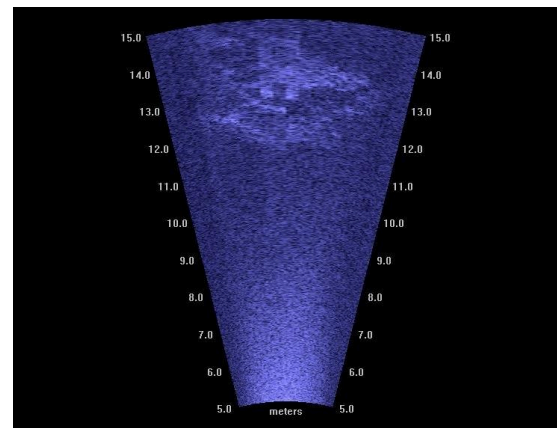


FIGURE 25 – Echo du didson à la surface.

TABLEAU 2 – Fonctionnement (nombre de suivis de 30 minutes) du didson en fonction de l’ouverture de la vanne et de la position, s = appareil en surface, $f5$ = 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.

	$f5$	s	n
0	1948	3260	0
1	116	1144	0
3	242	0	0

TABLEAU 3 – Fonctionnement du didson en fonction de l’ouverture de la vanne et de la position pour l’ensemble des saisons de suivi, *s*= appareil en surface, *f*3 *f*5= 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.

	f3	f5	n	s	sl
0	3255	19761	201	20086	434
1	95	929	4808	1813	56
2	254	466	63	136	10
3	431	1507	0	348	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 26) :

- 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 25.0% du temps,
- Dans tous les autres cas, le pertuis 4 est ouvert
 - le didson n’a pas pu être positionné (problèmes techniques) 19.0% du temps, (rectangles **orange**),
 - le didson fonctionne, il est bien positionné 46.0% du temps (rectangles **turquoise**),
 - le didson fonctionne, mais il est mal positionné (rectangles **marron**), mais les fichiers ont quand même fait l’objet d’un dépouillement seulement 1.0% du temps,
 - les fichiers du didson n’ont pas été lus, ou le didson n’a pas fonctionné pendant 10.0% du temps (zones **grises**).

Cette année, les problèmes de fonctionnement du didson en octobre et novembre sont visibles (en orange, Figure 26a). L’absence d’automate a entraîné certaines périodes où le didson était mal positionné (en marron). En février, le didson a été retiré de l’eau et donc n’a pas fonctionné

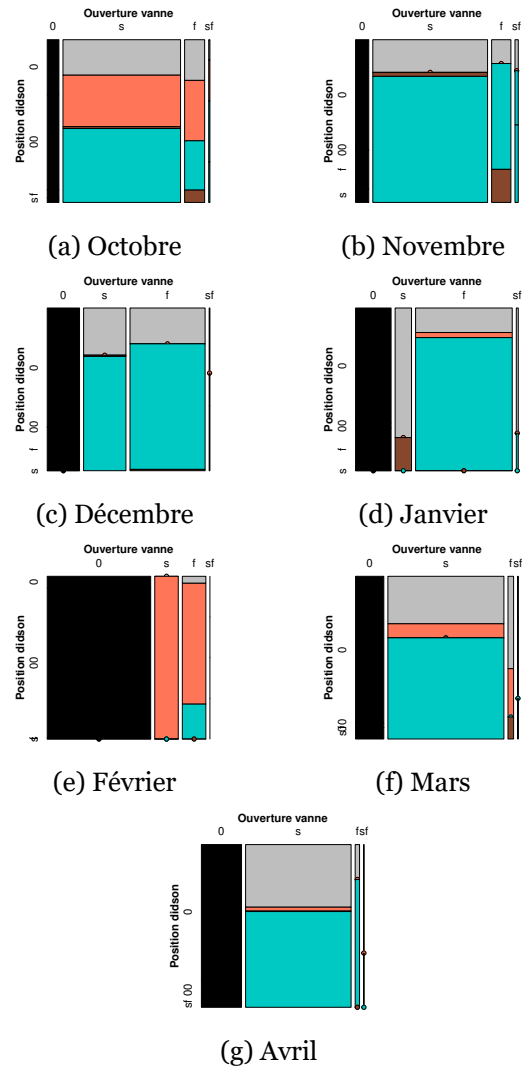


FIGURE 26 – Position du didson et de la vanne 4, taille des rectangles relative au nombre d’occurrences d’un type de positionnement de vanne et d’un type de positionnement didson pour chaque mois. En lignes, positionnement du didson, 0 = pas de lecture, s = surface (Figure 9), f=fond (Figure 10). En 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 périodes) la vanne 4 est fermée et une vanne ou un volet continue à déborder. Grâce à l’automate, le nombre de périodes où le didson est mal placé s’est considérablement réduit.

(en orange Figure 26e), mais pour l'essentiel, les problèmes sur la centrale 4 ont entraîné l'absence de manoeuvre et la vanne et les volets sont restés fermés (en noir, Figure 26e). Les problèmes d'enregistrement au pic des crues et après la détérioration du câble en mars et avril sont par contre très importants. (Figures 26c 26e 26f et 26g - en violet, Figure 54 rectangles verts). Les fichiers non dépouillés en gris correspondent majoritairement aux fichiers entre 9h et 10h, après le lever du soleil (Figure 36).

Les périodes d'incident technique couvrent 19% du temps. Le *positionnement* du didson par rapport aux ouvertures au fond ou en surface est correct 46% du temps. La vanne 4 (ou le volet 4) sont fermés 25% 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 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 lorsqu'on rassemble les images de toutes les saisons (Figures 27b, 27c) :

- 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.

Pour la saison 2020-2021 les détections sont majoritairement faites en vannes. Dans ces conditions, les détections de petites anguilles $\tau < 45\text{cm}$ mâles et 45-60cm petites femelles sont très réduites, et ces effectifs faibles se traduisent dans le diagramme 27c où dominant les anguilles de 60 à 80cm. On ne retrouve pas comme l'année précédente, de moins bonnes qualités d'anguilles détectées dans les deux premières classes de distance, mais une diminution progressive de la qualité à mesure que l'on s'éloigne du didson ou que la taille des anguilles diminue. Il est possible que les observations à grande vitesse de courant aient été moins nombreuses. La fin des travaux sur la vanne voisine a peut être également limité les écoulements turbulents en rive.

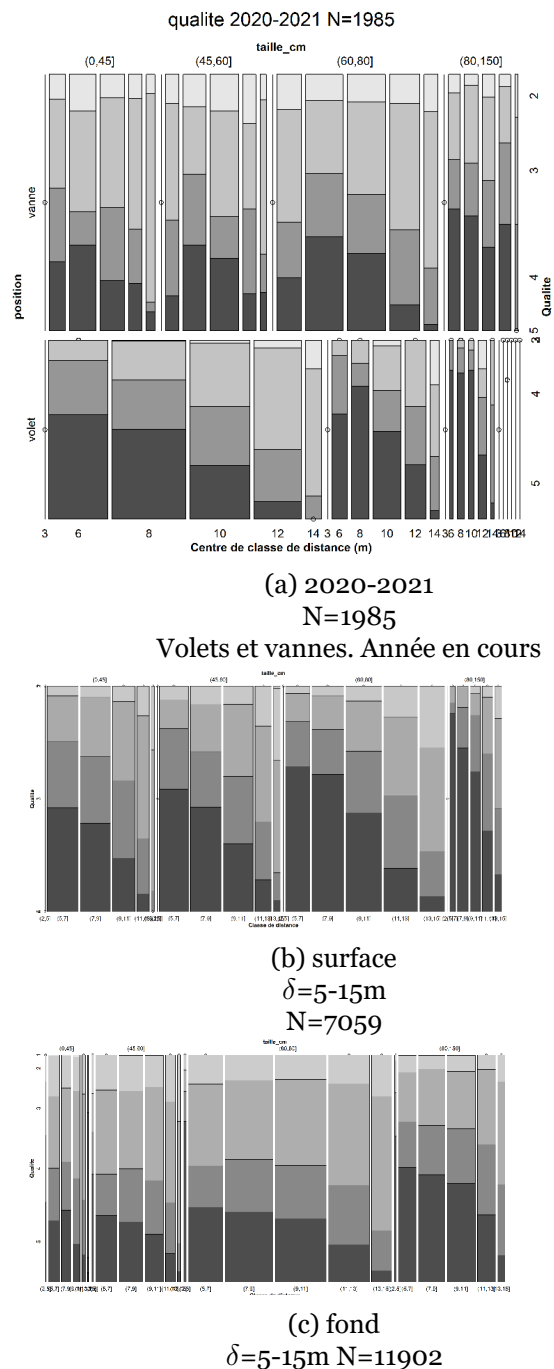


FIGURE 27 – Qualité des détections en fonction des classes de distance. En haut données de l'année en cours, deux graphiques du bas groupement de l'ensemble des années disponibles. La taille verticale ou horizontale est relative à l'effectif dans chacune des catégories. Qualité 5 = pas de doute possible, qualité 1 = fort doute.

2.2 Taille des anguilles et efficacité

L'analyse de l'efficacité a été conduite sur l'ensemble des anguilles détectées (18 961) en fonction de la distance au didson et de la taille des anguilles. Les anguilles de plus petite taille sont clairement moins détectées loin du didson (Figures 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 30).

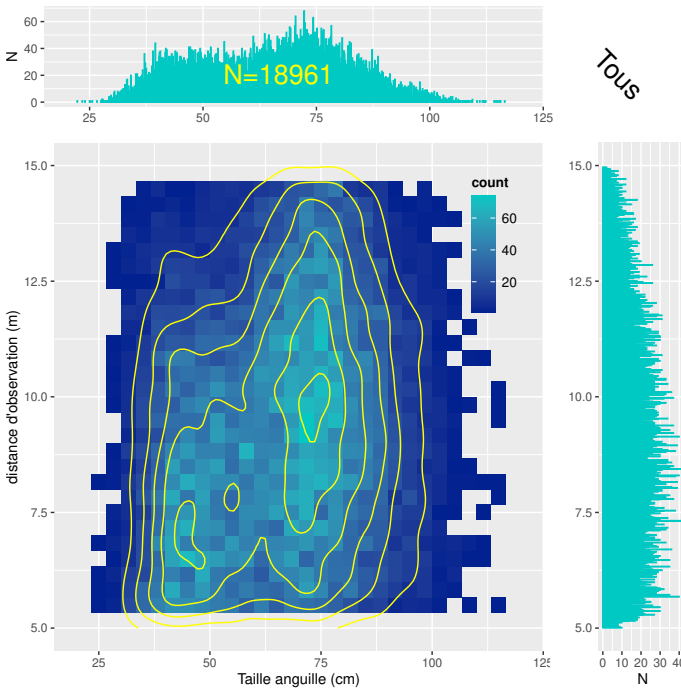


FIGURE 28 – Taille des anguilles en fonction de la distance au sonar. Couleur en fonction du nombre d'observations par carré. Les polygones d'isodensité permettent de mettre en évidence la relation distance - taille (les plus petites anguilles ne sont visibles que près du didson). Les données correspondent à toutes les anguilles enregistrées depuis 2012.

La comparaison de la distribution des tailles observées en fonction de la distance au didson met clairement en avant l'arrivée de nombreuses anguilles mâles qui n'avaient pas été observées jusqu'alors (Figures 28, 30).

Les tailles changent en fonction de la période (Test $\chi^2 p<0.001$) et les petits mâles sont observés en début de saison. La Figure 31 teste l'hypothèse que les classes de tailles soient distribuées de manière homogène en fonction des mois, de nouveau en regroupant l'ensemble des années de suivi. La couleur bleue indique qu'il y a plus d'anguilles dans une des

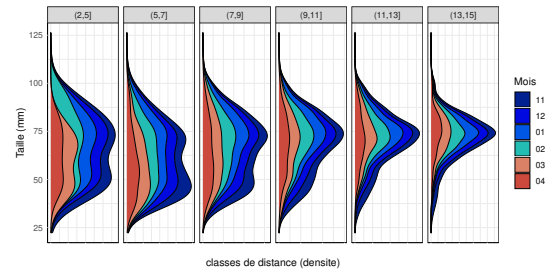


FIGURE 29 – Structure de taille des anguilles en fonction de la distance au sonar et du mois pour l'ensemble des saisons de suivi depuis 2012-2013.

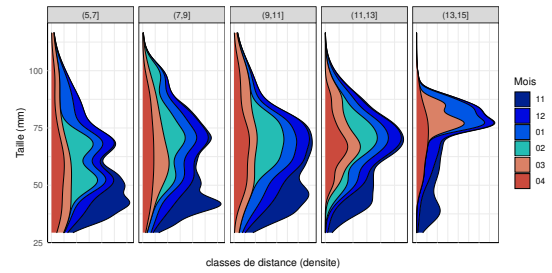


FIGURE 30 – Structure de taille des anguilles en 2020-2021 en fonction de la distance au sonar et du mois.

classes que dans une distribution homogène. On retrouve le fait qu'il y ait moins d'anguilles de grande taille et plus d'anguilles de petite taille (mâles <45 mm) en début de saison (Figure 31). *A contrario*, les anguilles de plus petites tailles sont moins nombreuses en décembre et janvier (en rouge).

La structure en *taille* des anguilles varie en fonction de la distance au didson. Les anguilles sont plus difficiles à détecter loin du didson. L'efficacité de la détection est également plus faible pour les petites anguilles.

2.2.1 Calcul de l'efficacité

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). Toutes les variables sont traitées comme des facteurs qualitatifs. L'efficacité est ensuite calculée à l'aide d'un modèle linéaire généralisé binomial (Formule 7). Le modèle retenu est le modèle $\delta + \tau + k + \text{saison} + \delta * \tau$. Il existe une interaction entre la taille et la distance ($\delta * \tau$) (Figure 32, Tableau 10). En d'autres termes, en plus d'un effet direct de la taille pour l'efficacité, la réponse en fonction de la distance dépend de la

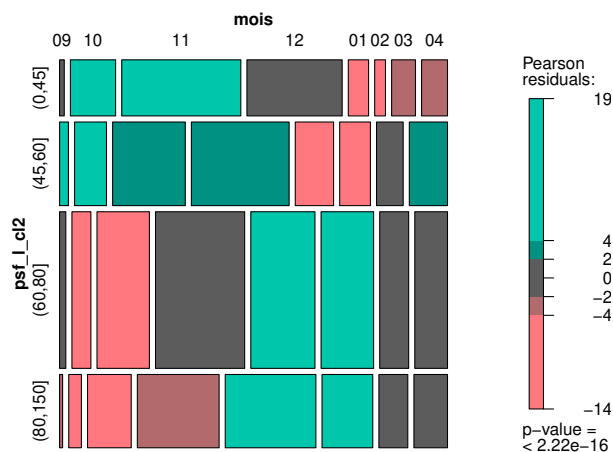


FIGURE 31 – Diagramme en mosaïque montrant la relation entre la taille et le mois. En rouge et bleu, les catégories qui sont significativement différentes au seuil de 90 et 99%. L'ensemble des saisons de migration est analysé dans ce graphique. (ZEILEIS, MEYER ET HORNIK, 2007).

taille. Pour l'ensemble des années, les diminutions d'effectifs en fonction de la distance au didson sont résumées en figure 55, les efficacités sont calculées en figure 56 et les nombres corrigés issus du recalcul sont présentés en figure 57 et 56 (les trois figures sont en annexe).

L'efficacité moyenne (Formule 8) est de 60% en surface et 48% au fond.

2.3 Migration

2.3.1 Migration en fonction du cycle nyctéméral

Le suivi des migrations a été effectué entre 17 h et 9 h (Figure 23).

En compilant l'ensemble des saisons avec des suivis toute la journée, nous disposons de 117 journées pour lesquelles le suivi a été effectué au delà de ces heures. Le pourcentage d'anguilles migrant de 9h30 à 17h30 est de $\mu=9.5^4$ (Figure 33a).

4. Les deux années 2013–2014 et 2014–2015, un coefficient de $\mu = 11.9\%$ avait été utilisé (BRIAND, SAUVAGET ET ERIAU, 2015; BRIAND, SAUVAGET ET ERIAU, 2016), puis une valeur de 5.6 %.

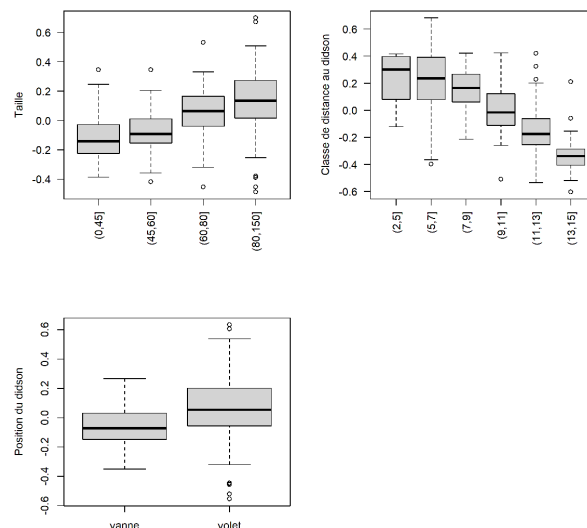


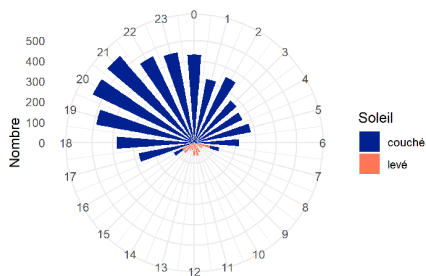
FIGURE 32 – Prédiction et résidus de la modélisation linéaire de l'efficacité du didson, en fonction de la taille et de la distance au didson, pour les deux positions du sonar en fin de saison. Attention il existe en plus une interaction entre la taille et la distance, cet effet est ignoré ici.

Sur les périodes sur lesquelles le dépouillement complet a été effectué, il n'est pas évident qu'il y ait un biais lié à des ouvertures du barrage plus importantes à certaines heures (Figure 33b).

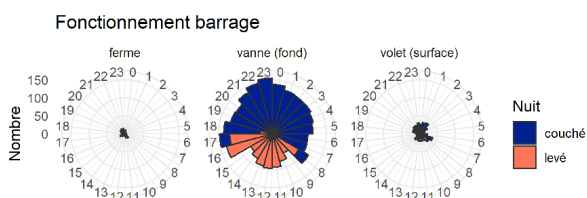
Une modélisation prenant en compte le caractère circulaire des données conduit aux résultats Figure 33c avec un pic de passage vers 21 h Figure 33, Tableau 4.

2.3.2 Comportement de migration

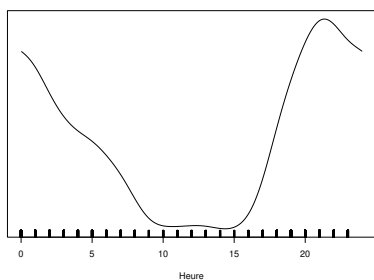
Les différents comportements de nage, et de traversée du faisceau, sont décrits en matériel et méthodes (paragraphe 1.7). Il semble y avoir un effet du type de nage sur la probabilité qu'une anguille traverse tout l'écran (χ^2 p=0). Les anguilles en nage à contre courant ont en effet une probabilité plus forte que les autres de rentrer dans le faisceau. La proportion d'anguilles effectuant une traversée complète (24%) est faible ce qui indique une prospection verticale de la colonne d'eau par les anguilles. Comme pour les autres saisons, cette prospection est plus importante lorsque le didson est positionné en surface (Tableau 6).



(a) Horaires de passages toutes saisons



(b) heures de fonctionnement du barrage.



(c) modèle circulaire.

FIGURE 33 – Horaires de passage des anguilles en fonction de l’alternance jour nuit (voir Figure 33a), (a) pour les 117 jours où un suivi de 24 h a été effectué sur l’ensemble des saisons, (b) fonctionnement du barrage pour ces mêmes jours, (c) modélisation des effectifs horaires par un modèle circulaire.

TABLEAU 4 – Répartition horaire des anguilles détectées au didson, nuit = suivi 1335 jours toute la saison entre 18h 00 et 9h00 , 24 h=répartition pour les 117 jours de suivi complet, 24 h cor= idem mais valeurs corrigées des ouvertures de vannes.

	24 h	24 h cor.	nuit
1	450	368	1659
2	432	377	1523
3	317	278	1171
4	357	336	1087
5	273	287	912
6	261	283	740
7	281	322	662
8	221	221	586
9	124	116	369
10	44	64	49
11	47	61	
12	52	61	
13	65	77	
14	62	77	
15	36	50	
16	41	65	
17	65	60	
18	111	100	
19	277	256	1038
20	380	356	1507
21	488	457	1888
22	550	450	2454
23	559	428	2246
24	469	344	1907
Somme	5962	5494	19798

TABLEAU 5 – Effectifs de comportements observés en surface et en vanne, 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	InOut	Out
A	336	421	311	189
R	17	56	264	102
M	4164	5778	5070	2253

TABLEAU 6 – Pourcentage d’anguilles effectuant la traversée du faisceau, <-> traversée complète, In entrée par le dessus ou le dessous, Out sortie par le dessus ou le dessous, N vanne=11902, N volet=7059.

	fond	surface
<->	29	14
In	31	37
InOut	28	33
Out	12	16

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 34). Le poids moyen des anguilles est estimé à 384g. Les sexes ratios calculés en

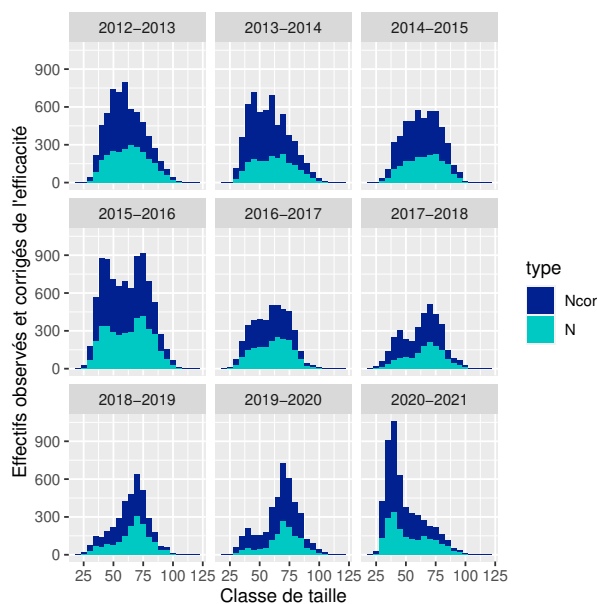


FIGURE 34 – Structure en taille des anguilles, en turquoise effectifs bruts (N), en bleu foncé effectifs corrigés de l’efficacité (Ncor).

utilisant une limite de taille entre les mâles et les femelles à 450 mm (ACOU et al., 2010) s’établissent à 24 % de mâles en 2020-2021, soit la plus importante proportion de mâles observée jusqu’alors. Les chiffres de sexe ratio montrent une diminution puis une réaugmentation de la proportion de mâles. Les premières années 2012-2013 et 2013-2014, ce pourcentage était de 12 et 15 % (BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2014; BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2015), 9% en 2014-2015 et

2015-2016 (BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2016; BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2018a), 7% en 2016-2017 (BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2018b), 5% en 2017-2018 (BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2018b), 7 % en 2018-2019 (BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2019), 8% en 2019-2020 (BRIAND, SAUVAGET et ERIAU, 2020).

D’après la structure en taille corrigée de l’efficacité, le poids moyen des anguilles argentées est estimé à 384g pour la dévalaison 2020–2021.

2.3.4 Estimation des effectifs migrants

Un total de 18 961 anguilles a été compté au didson sur l’ensemble de la période de suivi depuis 2012 dont 1 985 pour l’année en cours. Lorsque plusieurs lectures sont disponibles pour un même fichier, les fichiers correspondant au meilleur filtre (CSOT) de dépouillement sont utilisés. Ce nombre diminue à 18 347 anguilles lorsqu’on ne sélectionne que les anguilles comptées entre 18 h et 8h . Puis il diminue encore à 16 503 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 41% du temps.

A partir de cette sélection, les différentes étapes d’extrapolation conduisent aux effectifs N_{\odot} décrits au tableau 11. 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 168 enregistrements (\otimes), contre 181 enregistrements en fonctionnement normal (\odot). Les effectifs extrapolés à partir des migrations observées le même jour est de $N \otimes = 2\,131$ anguilles argentées.

Sur l'ensemble des années, il y a eu 212 journées avec aucun enregistrement du fait de problèmes d'acquisition ou d'écriture disque (Figure 36). 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 journées manquantes est estimée à $N = 9\,284$ anguilles argentées (Figure 35).

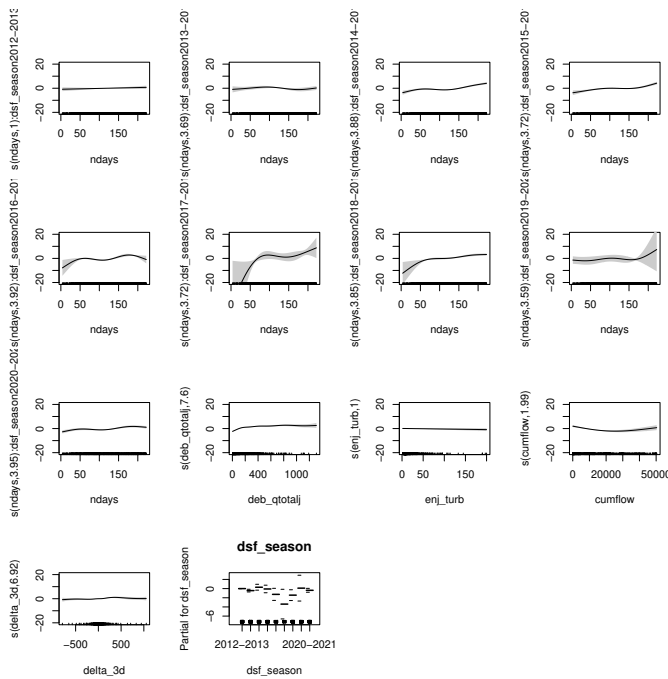


FIGURE 35 – Modélisation des effectifs manquants à l'aide d'un modèle gam (tendance saisonnière + effet saison + débit + cumul débit depuis le début de la saison) + turbidité + variation du débit à 3 jours (delta 3d).

Les différentes étapes de la reconstitution des effectifs sont résumées dans le tableau 11 et aboutissent

à l'estimation d'un effectif de 52 199 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 20.1 tonnes.

La migration estimée par mois est présentée au tableau 12, le résumé du modèle est présenté au tableau 13 en annexe. Le modèle est identique à celui de l'année précédente mais les débits à 3 jours (delta 3d) ont été utilisés en lieu des débits à 7 jours.

Les effectifs extrapolés à partir des données considérées comme fiables ($N \odot = 49\,835$, les effectifs modélisés pour les mauvaises configurations ($N \otimes = 2\,131$) et les effectifs extrapolés pour les jours sans estimation ($N \oplus = 9\,284$) donnent une estimation quantitative partielle des effectifs d'anguilles argentées en dévalaison sur la Vilaine $N = 52\,199$ soit 20.1 tonnes (Tableau 11).

3 Discussion

3.1 Migration

Plusieurs pics de débits autour de $100\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ ont été observés très tôt dans la saison en octobre et novembre. Ces pics se sont accompagnés par des pics de migration de l'ordre de 1500 anguilles par jour. Lors du deuxième pic la migration est reconstituée car l'ordinateur a eu des problèmes d'acquisition. Plus tard dans la saison en janvier et février, deux pics de débits avec des débits de grande crue de l'ordre de $700\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ se sont succédés. Le premier pic, composé d'une première vague de débit puis d'un ressaut, a permis la migration d'effectifs journaliers de l'ordre de 3000- 4000 anguilles par jour lors du pic. Le didson a été retiré de l'eau lors du deuxième pic, mais sur plusieurs nuits, les effectifs en migration étaient nuls, et la qualité des images était suffisamment bonne pour pouvoir détecter les anguilles argentées car la turbidité était faible. Il est très probable que les effectifs ayant migré lors de ce deuxième pic ont été faibles (ce que donne le modèle de prédiction) car les forts débits du mois de janvier ont déjà permis le départ d'une grande part du stock potentiel d'anguilles argentées du bassin. Globalement, les effectifs totaux sur la saison sont de $N = 52\,199$ soit 20.1 tonnes (Tableau 11, Figure 38).

TABLEAU 7 – Nombre de lamproies marines comptées au didson en fonction des saisons de suivi. Entre parenthèse les lamproies en direction descendante.

Année	effectif
2012–2013	640
2013–2014	29
2014–2015	275
2015–2016	655+(278)
2016–2017	7+(1)
2018–2019	1
2019–2020	0
2020–2021	58

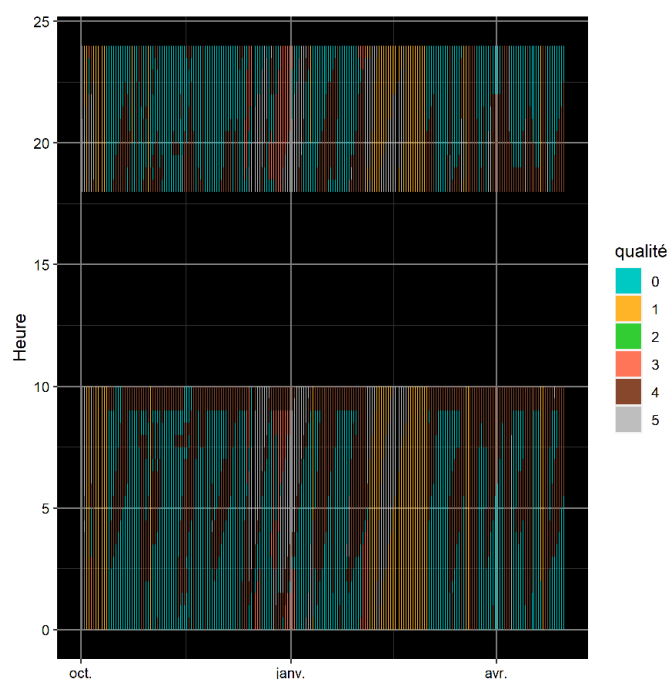


FIGURE 36 – Fonctionnement du didson. Les rectangles correspondent chacun à une période d'enregistrement, 0 ■ enregistrement normal, 1 ■ problème d'acquisition, 2 ■ problème d'écriture, 3 ■ problème de qualité, 4 ■ mauvais positionnement du didson ou écoulement ailleurs sur le barrage, 5 ■ vanne fermée mais ensemble du barrage fermé également.

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). En 2020-2021, 58 lamproies marines (*Petromyzon marinus*) ont été détectées, une en février, une en mars, et le reste les 12 et 13 avril. Dans la passe à bassins, les principales migrations de lamproies ont été observées entre le 31 mars et le 16 avril. La première lamproie observée (02/02) arrive avant la première observation sur la passe car le suivi vidéo ne débute que fin février.

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.

3.2.3 Efficacité moyenne

Les efficacités moyennes sont plus faibles que celles calculées historiquement depuis le nouveau calcul en 2020 intégrant la qualité des anguilles dans le calcul (Tableau 8, Tableau 14 en annexe). Cette année l'efficacité est meilleure que l'année dernière ou l'arrêt de la vanne 3 provoquait des turbulences devant le didson.

TABLEAU 8 – Efficacité du didson (E) en fonction de la saison et de la position.

	saison	position	E
1	2012-2013	vanne	0.45
2	2012-2013	volet	0.50
3	2013-2014	vanne	0.29
4	2013-2014	volet	0.40
5	2014-2015	vanne	0.30
6	2014-2015	volet	0.41
7	2015-2016	vanne	0.35
8	2015-2016	volet	0.47
9	2016-2017	vanne	0.37
10	2016-2017	volet	0.49
11	2017-2018	vanne	0.36
12	2017-2018	volet	0.48
13	2018-2019	vanne	0.37
14	2018-2019	volet	0.49
15	2019-2020	vanne	0.31
16	2019-2020	volet	0.39
17	2020-2021	vanne	0.42
18	2020-2021	volet	0.54

3.3 Synthèse inter-annuelle

Les effectifs par an et leur recalcul à partir d'un modèle intégrant les données de toutes les années sont comparés (Tableau 9 et Figure 38). De 2014 à 2017 les effectifs ont augmenté, probablement du fait du recalcul de l'efficacité. Ils ont diminué pour 2017-2018 et 2018-2019, et ces deux saisons un calcul particulier avait été effectué pour corriger du problème de "myopie" des lentilles du didson. Il est possible que le nouveau calcul -qui ne prend pas en compte ce problème particulier- sous estime les effectifs⁵.

La tendance interannuelle est à la baisse, avec une légère augmentation à partir du minimum observé en 2017-2018. La réaugmentation des effectifs est

5. pas de détection dans la zone la plus éloignée du didson donc pas d'extrapolation des effectifs.

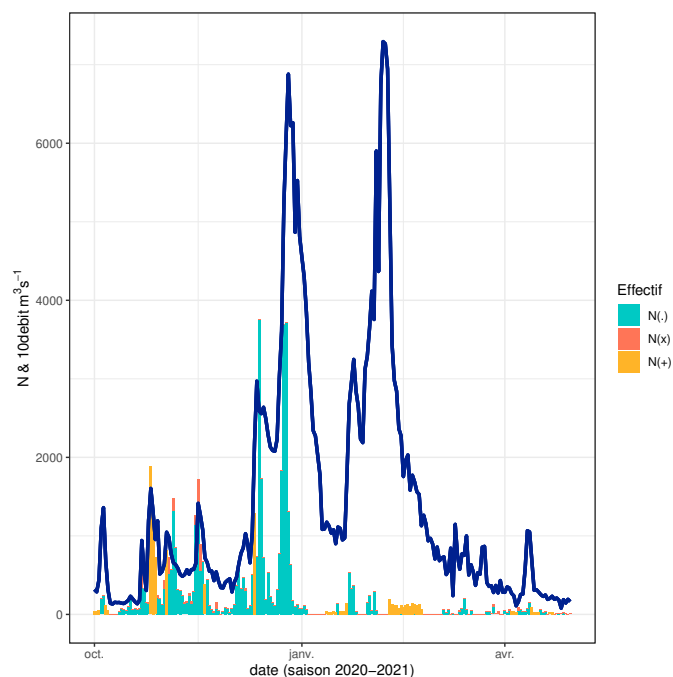


FIGURE 37 – Effectifs journaliers estimés sur l'ensemble du barrage, en turquoise $N(=)$ effectifs mesurés, en orange $N(x)$ effectifs extrapolés à partir de données de densité recueillies dans la journée. En jaune, $N(+)$ effectifs extrapolés à partir d'un modèle saisonnier. En bleu foncé — débits journaliers estimés au barrage d'Arzal $m^3.s^{-1}$ (multipliés par 10 pour des raisons graphiques).

TABLEAU 9 – Production en anguilles argentées de la Vilaine à partir des comptages au didson en fonction des saisons de suivi. N_{old} indique les effectifs calculés sur les rapports d'origine, N_{new} indique les effectifs recalculés en 2021 en assemblant toutes les données disponibles et utilisant des modèles communs. Débit maximum journalier $Q_{j,max} m^3.s^{-1}$. * comptages partiels pour les effectifs "old".

Année	N_{old}	N_{new}	$Q_{j,max} m^3.s^{-1}$
2012-2013	130 000	129 999	750
2013-2014	119 616	148 906	1 000
2014-2015 *	69 509	119 730	400
2015-2016	114 186	142 568	320
2016-2017	81 366	106 358	200
2017-2018	68 160	50 700	200
2018-2019	64 578	61 778	200
2019-2020	-	100 548	1 000
2020-2021	-	52 199	700

cohérente avec une modification du sexe ratio à partir du minimum (5% de mâles) observés en 2017-2018. Globalement même sur une période d'observation relativement courte (série de moins de 10 ans), les effectifs sont en baisse. Sur le bassin versant de la Vilaine, le stock en place est plus qu'ailleurs la résultante des mesures de gestion prises sur la phase civelle. L'augmentation de la proportion de mâles traduit probablement l'effet combiné de l'introduction des quotas, de l'augmentation des migrations sur la passe et du transport de civelles qui s'est traduit par un pic de recrutement fluvial entre 2012 et 2014. Les mâles partant en 2021 auraient un âge continental de 6 à 8 ans ce qui est cohérent avec les données de croissance recueillies sur le bassin. Il est donc probable que cet effectif de mâles donne le pas à un départ de femelles argentées dans les années qui viennent. Les effectifs plus importants observés l'année dernière (2019-2020) sont peut être lié à l'effet d'une grande crue suivant plusieurs années sans débit important qui aurait permis le départ d'un plus grand nombre d'anguilles argentées, bloquées dans leur progression par la succession d'ouvrages entravant leur migration.

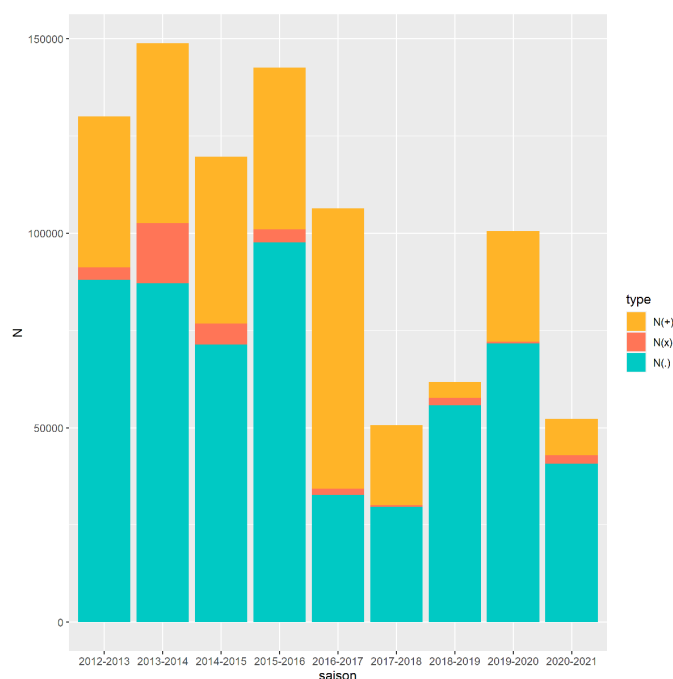


FIGURE 38 – Effectifs annuels estimés sur l'ensemble du barrage, en turquoise (N) ⊙ ⊔ = effectifs mesurés, en orange N ⊗ ⊔ = effectifs extrapolés à partir de données de densité recueillies dans la journée et extrapolés en fonction du ratio des débits lors des observations et sans. En jaune, N ⊕ ⊔ effectifs extrapolés à d'un modèle saisonnier.

4 Annexes

4.1 Comptage par positions

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). Chaque figure correspond à un des positionnements du didson et un type d'écoulement : volet, vanne ou fermé. Φ = fonctionnement de la vanne (s= surface, f=fond, o=pas d'écoulement), β angle du didson, h = hauteur du didson en côte orthométrique, O_t = nombre de périodes de 30 minutes, O_{t^o} = 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.

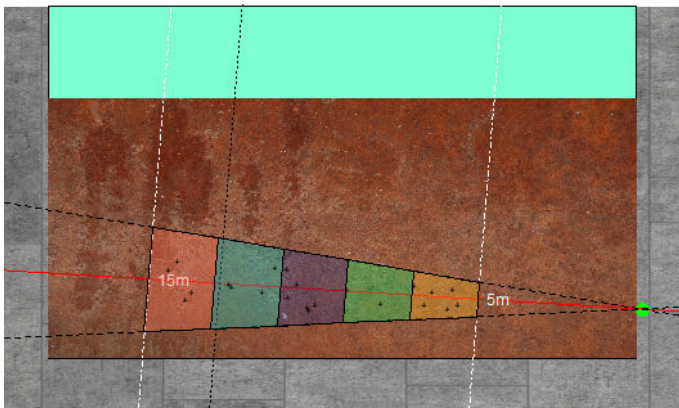


FIGURE 39 - $\Phi=0$, $\beta=4$, $h=-6$, $O_t=43$, $O_{t^o}=8$, $N'_{40+}=22$, $N'_{40-}=1$, date= 04 oct. au 19 nov.

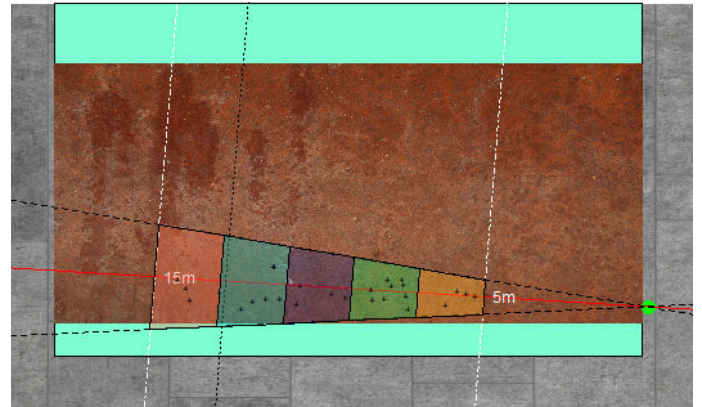


FIGURE 40 - $\Phi=f$, $\beta=4$, $h=-6$, $O_t=68$, $O_{t^o}=36$, $N'_{40+}=27$, $N'_{40-}=2$, date= 04 oct. au 19 nov.

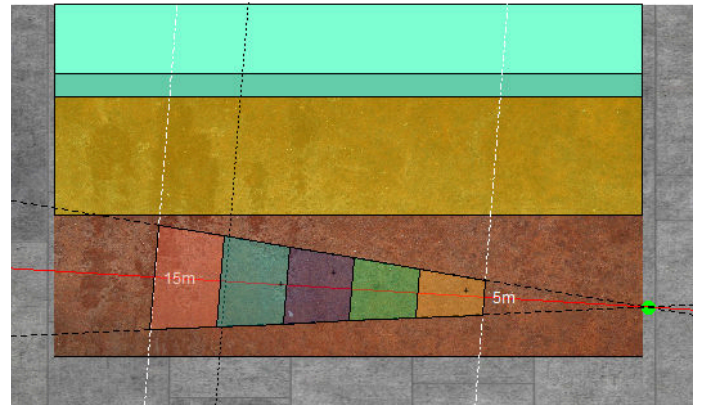


FIGURE 41 - $\Phi=s$, $\beta=4$, $h=-6$, $O_t=85$, $O_{t^o}=7$, $N'_{40+}=3$, $N'_{40-}=0$, date= 06 oct. au 19 nov.

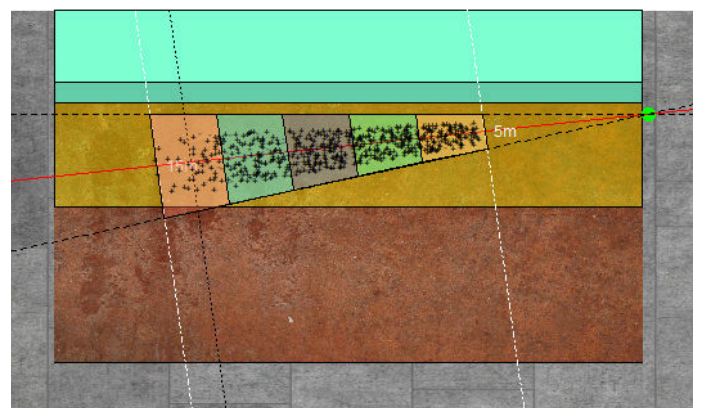


FIGURE 42 - $\Phi=s$, $\beta=-7$, $h=1$, $O_t=3123$, $O_{t^o}=1984$, $N'_{40+}=582$, $N'_{40-}=172$, date= 07 oct. au 30 avr.

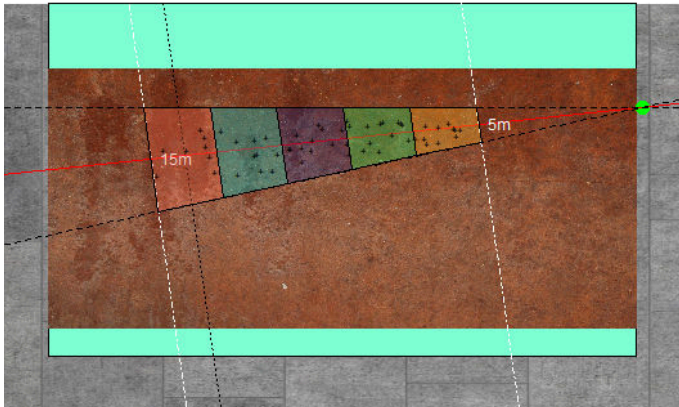


FIGURE 43 - $\Phi=f$, $\beta=-7$, $h=1$, $O_t=258$, $O_t^o=59$,
 $N'_{40}+=55$, $N'_{40}-=7$, date= 22 oct. au 23 mars

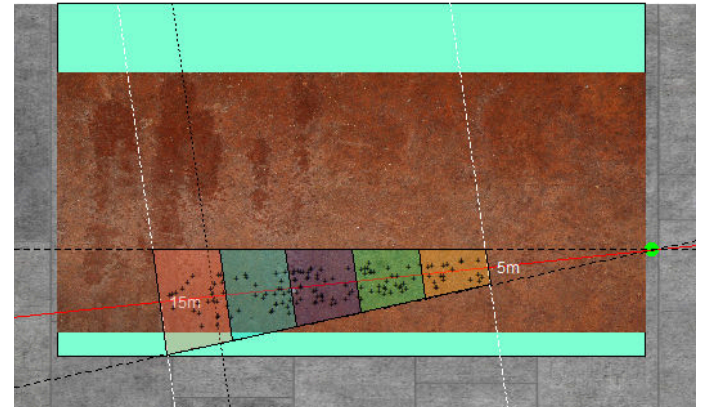


FIGURE 46 - $\Phi=f$, $\beta=-7$, $h=-4$, $O_t=108$, $O_t^o=94$,
 $N'_{40}+=138$, $N'_{40}-=2$, date= 28 oct. au 18 nov.

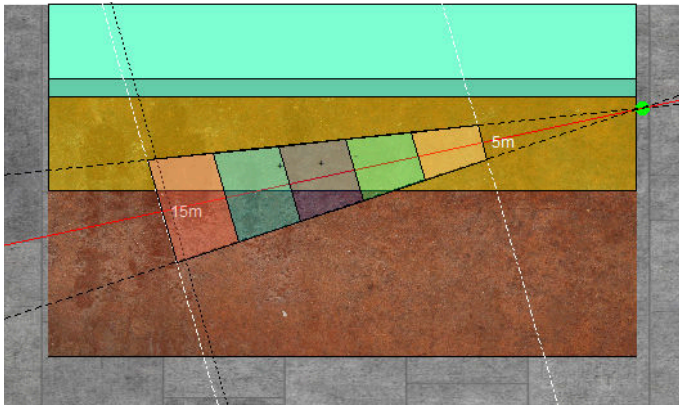


FIGURE 44 - $\Phi=s$, $\beta=-14$, $h=1$, $O_t=20$, $O_t^o=18$,
 $N'_{40}+=2$, $N'_{40}-=-1$, date= 23 oct. au 24 oct.

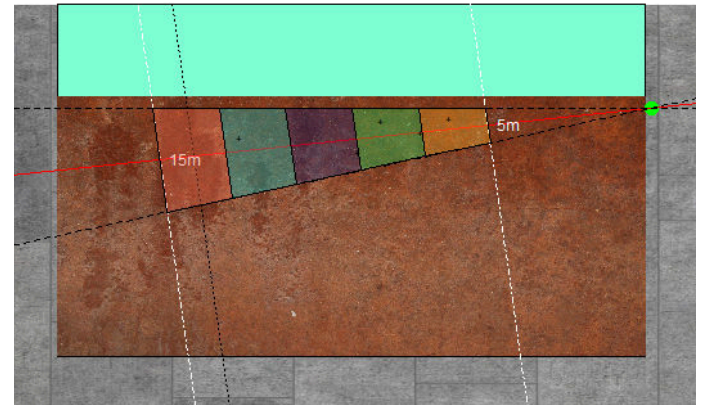


FIGURE 47 - $\Phi=0$, $\beta=-7$, $h=1$, $O_t=1046$, $O_t^o=29$,
 $N'_{40}+=5$, $N'_{40}-=-0$, date= 31 oct. au 26 avr.

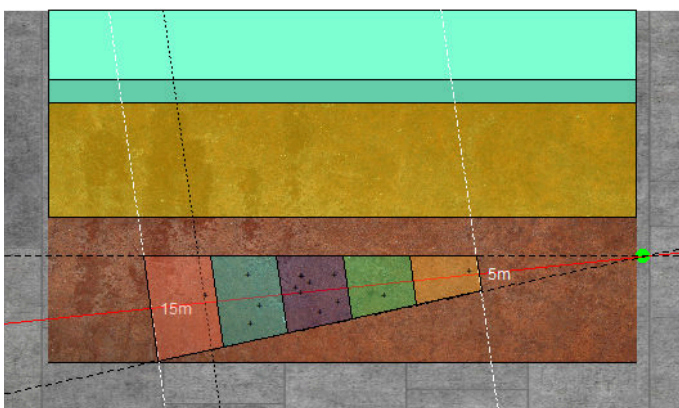


FIGURE 45 - $\Phi=s$, $\beta=-7$, $h=-4$, $O_t=34$, $O_t^o=30$,
 $N'_{40}+=14$, $N'_{40}-=-0$, date= 28 oct. au 18 nov.

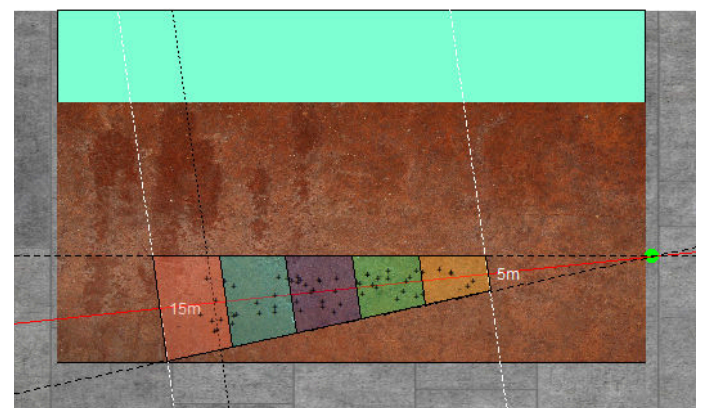


FIGURE 48 - $\Phi=0$, $\beta=-7$, $h=-4$, $O_t=29$, $O_t^o=16$,
 $N'_{40}+=59$, $N'_{40}-=-6$, date= 02 nov. au 18 nov.

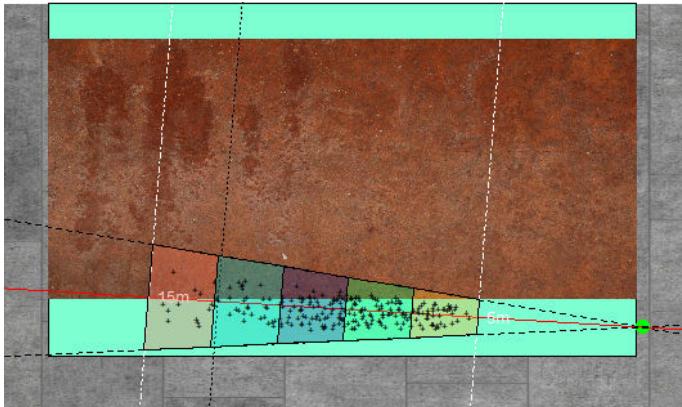


FIGURE 49 - $\Phi=f$, $\beta=4$, $h=-6.7$, $O_t=174$, $O_{t^\circ}=146$, $N'_{40+}=237$, $N'_{40-}=0$, date= 10 déc. au 28 déc.

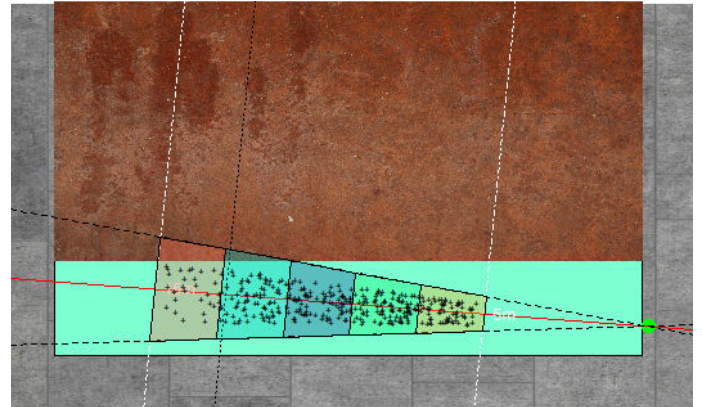


FIGURE 52 - $\Phi=f$, $\beta=5$, $h=-6.7$, $O_t=1005$, $O_{t^\circ}=815$, $N'_{40+}=358$, $N'_{40-}=3$, date= 18 déc. au 15 avr.

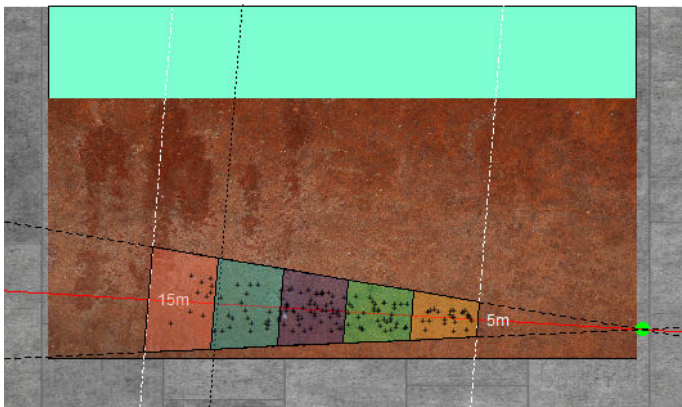


FIGURE 50 - $\Phi=0$, $\beta=4$, $h=-6.7$, $O_t=105$, $O_{t^\circ}=26$, $N'_{40+}=148$, $N'_{40-}=1$, date= 12 déc. au 28 déc.

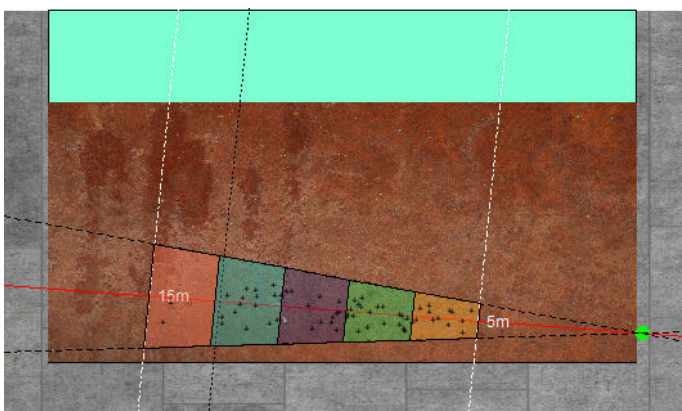


FIGURE 51 - $\Phi=0$, $\beta=5$, $h=-6.7$, $O_t=400$, $O_{t^\circ}=101$, $N'_{40+}=64$, $N'_{40-}=6$, date= 18 déc. au 15 avr.

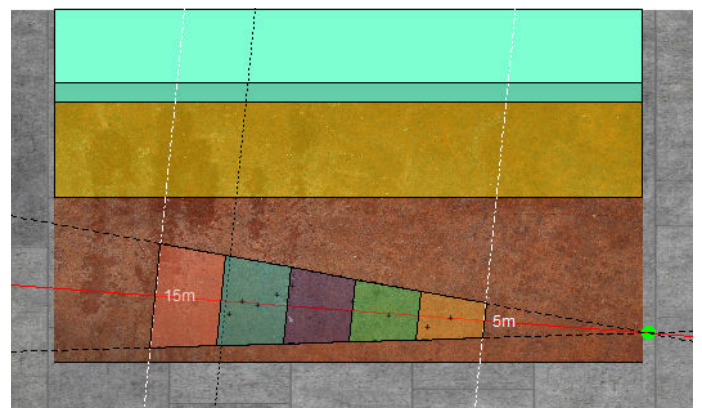


FIGURE 53 - $\Phi=s$, $\beta=5$, $h=-6.7$, $O_t=209$, $O_{t^\circ}=28$, $N'_{40+}=9$, $N'_{40-}=1$, date= 12 janv. au 16 avr.

4.2 Notations

τ	Tailles d'anguilles, <45cm mâles, 45-60cm petites femelles, 60-80cm femelles, >80cm 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°	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	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.

4.3 Tableaux

TABLEAU 10 – Analyse de variance du modèle logit des efficacités. τ = taille, δ = distance au didson

	<i>df</i>	<i>dev.</i>	<i>res.df</i>	<i>res.dev.</i>	<i>P(> chi²)</i>
<i>Resid.</i>			411	33.4	
δ	5	14.53	406	18.9	< 0.001
τ	3	3.86	403	15.1	< 0.001
<i>saison</i>	10	2.02	393	13.0	< 0.001
<i>k(position)</i>	1	1.42	392	11.6	< 0.001
$\delta * \tau$	15	2.06	377	9.6	< 0.001

TABLEAU 11 – 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, \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 mar-ron(4) sur la figure 36 et orange sur la figure 26. \oplus =périodes sans suivi, les points d'interrogation indiquent des extrapolations incertaines, \sum = Somme. Les positions s , $f3$, $f5$, sl indiquent : s position du didson en surface, $f3$ fond acquisition 3-13 m, $f5$ fond acquisition 5-15, sl didson regardant vers la surface ou le fond pour tenter de déterminer la position verticale des anguilles.

Saison	type	N'_{o4}	N_{o4}	N_4	N
2012-2013	$s\odot$	468	945	2 461	8 226
	$f3\odot$	630	1 433	17 093	57 141
	$f5\odot$	950	2 156	19 611	63 870
	$\sum \odot$	2 048	4 533	39 165	129 238
	$\otimes(?)$				3 227
	$\oplus(?)$				38 795
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				129 999
2013-2014	$s\odot$	870	2 160	6 304	27 522
	$f3\odot$	207	733	5 693	23 566
	$f5\odot$	353	1 250	7 367	31 076
	$sl\odot$	324	829	4 747	24 710
	$\sum \odot$	1 754	4 972	24 111	106 874
	$\otimes(?)$				15 457
	$\oplus(?)$				46 242
$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				148 906	
2014-2015	$s\odot$	526	1 276	5 793	13 935
	$f3\odot$	460	1 591	9 678	14 912
	$f5\odot$	772	2 581	13 854	54 116
	$\sum \odot$	1 758	5 448	29 324	82 963
	$\otimes(?)$				5 345
	$\oplus(?)$				42 970
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				119 730
2015-2016	$s\odot$	1 426	3 067	8 440	20 784
	$f5\odot$	2 133	6 356	33 708	126 683
	$\sum \odot$	3 559	9 424	42 148	147 467
	$\otimes(?)$				3 274
	$\oplus(?)$				41 604
$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				142 568	

TABLEAU 11 – (...suite ...)

Saison	type	N'_{o4}	N_{o4}	N_4	N
2016-2017	$s\odot$	1 003	2 046	7 387	21 733
	$f_5\odot$	782	2 119	11 485	40 186
	$\sum\odot$	1 785	4 165	18 872	61 920
	$\otimes(?)$				1 569
	$\oplus(?)$				72 082
	$\sum\odot\otimes\oplus(?)$				106 358
2017-2018	$s\odot$	189	395	1 159	4 400
	$f_5\odot$	1 096	3 056	16 803	53 339
	$\sum\odot$	1 285	3 450	17 962	57 738
	$\otimes(?)$				463
	$\oplus(?)$				20 602
	$\sum\odot\otimes\oplus(?)$				50 700
2018-2019	$s\odot$	779	1 586	3 970	17 176
	$f_5\odot$	896	2 416	13 055	50 574
	$\sum\odot$	1 675	4 002	17 024	67 750
	$\otimes(?)$				1 972
	$\oplus(?)$				4 074
	$\sum\odot\otimes\oplus(?)$				61 778
2019-2020	$s\odot$	73	186	419	2 172
	$f_5\odot$	1 043	3 415	18 167	80 203
	$\sum\odot$	1 116	3 601	18 586	82 376
	$\otimes(?)$				419
	$\oplus(?)$				28 375
	$\sum\odot\otimes\oplus(?)$				100 548

TABLEAU 11 – (...suite ...)

Saison	type	N'_{o4}	N_{o4}	N_4	N
2020-2021	$s\odot$	753	1 391	3 787	13 654
	$f_5\odot$	767	1 821	9 911	36 072
	$sl\odot$	3	6	25	110
	$\sum\odot$	1 523	3 218	13 723	49 835
	$\otimes(?)$				2 131
	$\oplus(?)$				9 284
	$\sum\odot \otimes \oplus(?)$				52 199

TABLEAU 12 – Effectif mensuel d'anguilles argentées estimé sur la Vilaine.

Saison	mois	N_{\oplus}	N_{\otimes}	N_{\ominus}
2012-2013	sept	0	371	1796
	oct	5748	1567	23511
	nov	9574	994	21265
	déc	12175	0	8928
	janv	1615	8	5259
	févr	348	0	5477
	mars	1164	269	7677
	avr	8170	18	14065
2013-2014	oct	0	421	440
	nov	44669	3950	11372
	déc	0	8708	47465
	janv	0	1923	11234
	févr	0	0	10327
	mars	1487	22	4059
	avr	85	434	2311
	oct	278	53	1109
2014-2015	nov	13607	10	36610
	déc	21776	272	326
	janv	2229	33	12796
	févr	2675	185	5140
	mars	2404	1031	5491
	avr	0	3760	9944
	sept	15	0	0
	oct	275	0	5
2015-2016	nov	660	222	1820
	déc	4962	361	8727
	janv	23972	1046	44390
	févr	392	20	17993
	mars	2028	150	10667
	avr	9300	1475	14089
	oct	134	0	0
	nov	1298	8	2464
2016-2017	déc	161	29	600
	janv	480	0	198
	févr	19316	221	15366
	mars	49558	1215	12283
	avr	1135	96	1796
	nov	34	0	0
	déc	14381	176	3103
	janv	4426	287	23481
2017-2018	févr	903	1	429
	mars	858	0	2621
	nov	50	0	238
	déc	121	84	12701
	janv	0	38	2148
2018-2019	févr	3326	10	29326
	mars	0	931	6927
	avr	576	908	4391

... suite page suivante...

TABLEAU 12 – Effectif mensuel d'anguilles argentées estimé sur la Vilaine.

Saison	mois	N_{\oplus}	N_{\otimes}	N_{\ominus}
2019-2020	oct	218	253	2379
	nov	0	158	34632
	déc	2732	0	17429
	janv	1529	8	8916
	févr	4800	0	8398
	mars	13004	0	0
	avr	6092	0	0
	2020-2021	oct	4180	390
nov		1203	1521	10123
déc		1288	40	23940
janv		448	8	2053
févr		1814	0	383
mars		0	91	781
avr		351	80	751

A. parametric coefficients	Estimate	Std. Error	t-value	p-value
(Intercept)	6.1341	0.2501	24.5241	< 0.0001
dsf_season2013-2014	-0.4386	0.1444	-3.0381	0.0025
dsf_season2014-2015	0.2986	0.3202	0.9323	0.3515
dsf_season2015-2016	-0.0820	0.4123	-0.1990	0.8423
dsf_season2016-2017	-1.2585	0.6585	-1.9110	0.0563
dsf_season2017-2018	-3.3851	1.6161	-2.0946	0.0365
dsf_season2018-2019	-1.4286	0.5884	-2.4280	0.0154
dsf_season2019-2020	0.0981	1.4079	0.0697	0.9445
dsf_season2020-2021	-0.3728	0.2112	-1.7646	0.0780
B. smooth terms	edf	Ref.df	F-value	p-value
s(ndays) :dsf_season2012-2013	1.0003	1.0006	1.0750	0.3001
s(ndays) :dsf_season2013-2014	3.6928	3.9458	5.5074	0.0001
s(ndays) :dsf_season2014-2015	3.8843	3.9909	37.1611	< 0.0001
s(ndays) :dsf_season2015-2016	3.7181	3.9531	18.3453	< 0.0001
s(ndays) :dsf_season2016-2017	3.9172	3.9946	29.3942	< 0.0001
s(ndays) :dsf_season2017-2018	3.7226	3.9311	5.7119	0.0002
s(ndays) :dsf_season2018-2019	3.8516	3.9796	18.9627	< 0.0001
s(ndays) :dsf_season2019-2020	3.5938	3.8495	6.0229	0.0001
s(ndays) :dsf_season2020-2021	3.9503	3.9977	9.7848	< 0.0001
s(deb_qtotalj)	7.6043	8.5178	42.4266	< 0.0001
s(enj_turb)	1.0000	1.0001	2.2138	0.1372
s(cumflow)	1.9852	1.9990	63.0918	< 0.0001
s(delta_3d)	6.9171	8.0391	4.8442	< 0.0001

TABLEAU 13 – Modèle de prédiction des effectifs

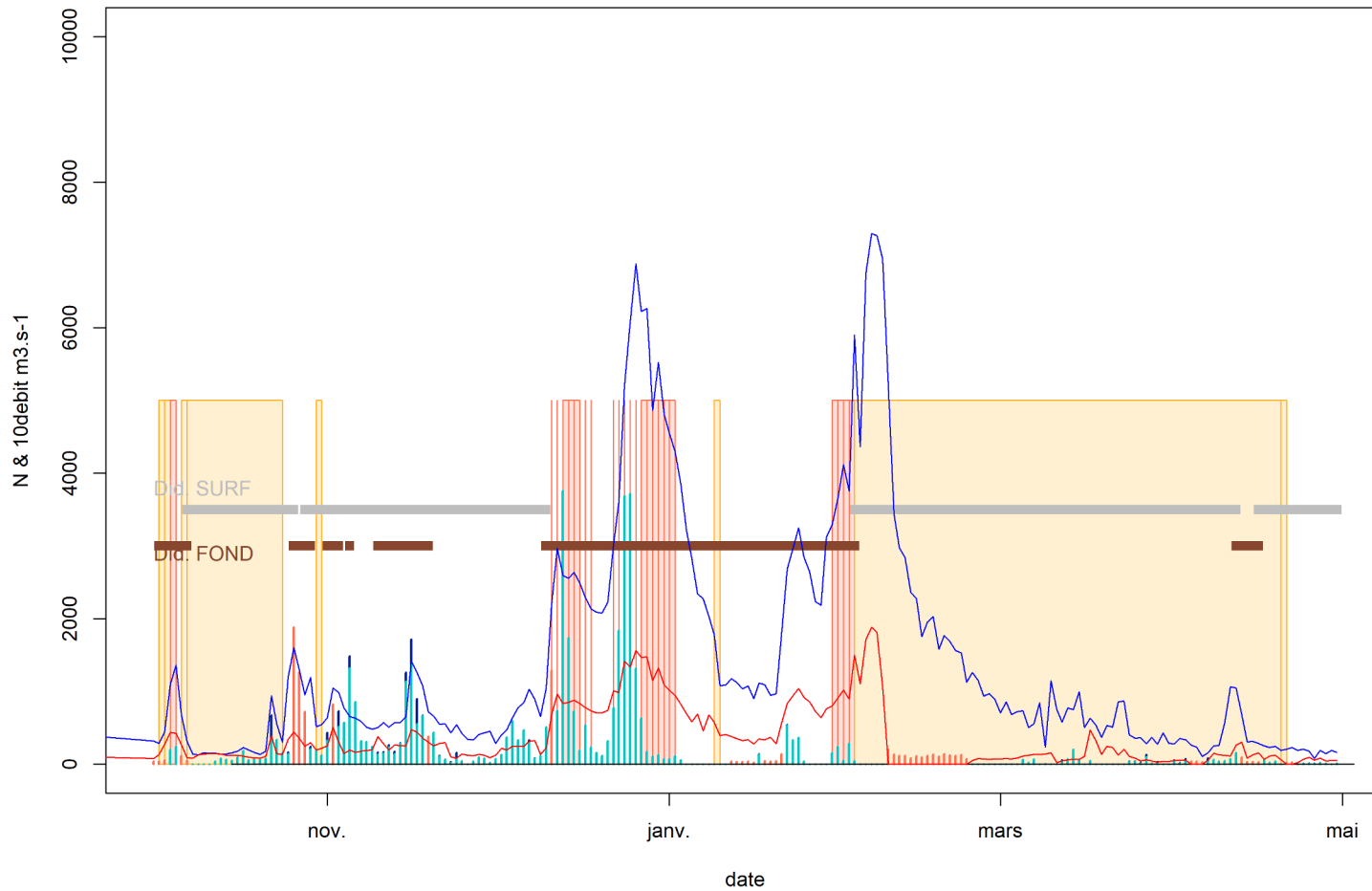


FIGURE 54 – Effectifs journaliers estimés sur l’ensemble du barrage, en turquoise (N) \ominus \equiv effectifs mesurés, en turquoise N \otimes \equiv effectifs extrapolés à partir de données de densité recueillies dans la journée. En orange, N \oplus \equiv effectifs extrapolés à partir des données des jours voisins. En bleu — , débits journaliers estimés au barrage d’Arzal $m^3.s^{-1}$ (multipliés par 10 pour des raisons graphiques). En rouge, — , débits de la vanne 4. Les barres en gris et marron indiquent la position verticale du didson. Les rectangles en arrière plan indiquent les problèmes d’acquisition (en jaune) et de qualité (en orange) ou d’écriture disque (en vert).

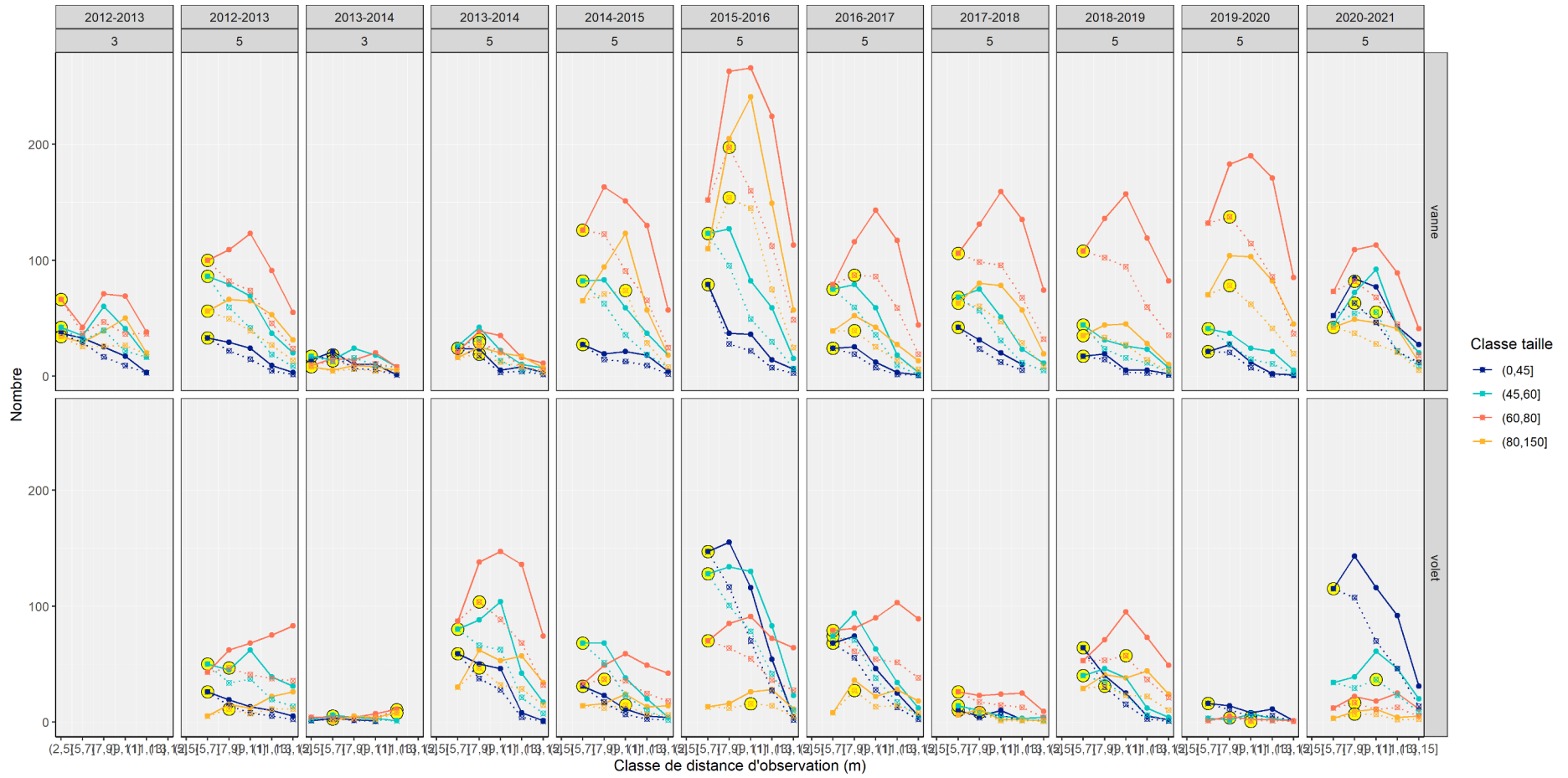


FIGURE 55 – Effectifs observés (traits pointillés) et corrigés de l'augmentation de la taille du faisceau (traits pleins) en fonction de la distance, pour l'ensemble des saisons et les deux classes de distance. Les cercles jaunes correspondent au maximum observé pour les effectifs corrigés (pas toujours au plus près du didson).

39



FIGURE 56 – Efficacité en fonction de la taille des anguilles et de la distance au didson, commune aux deux positions du sonar, fond et surface.

40

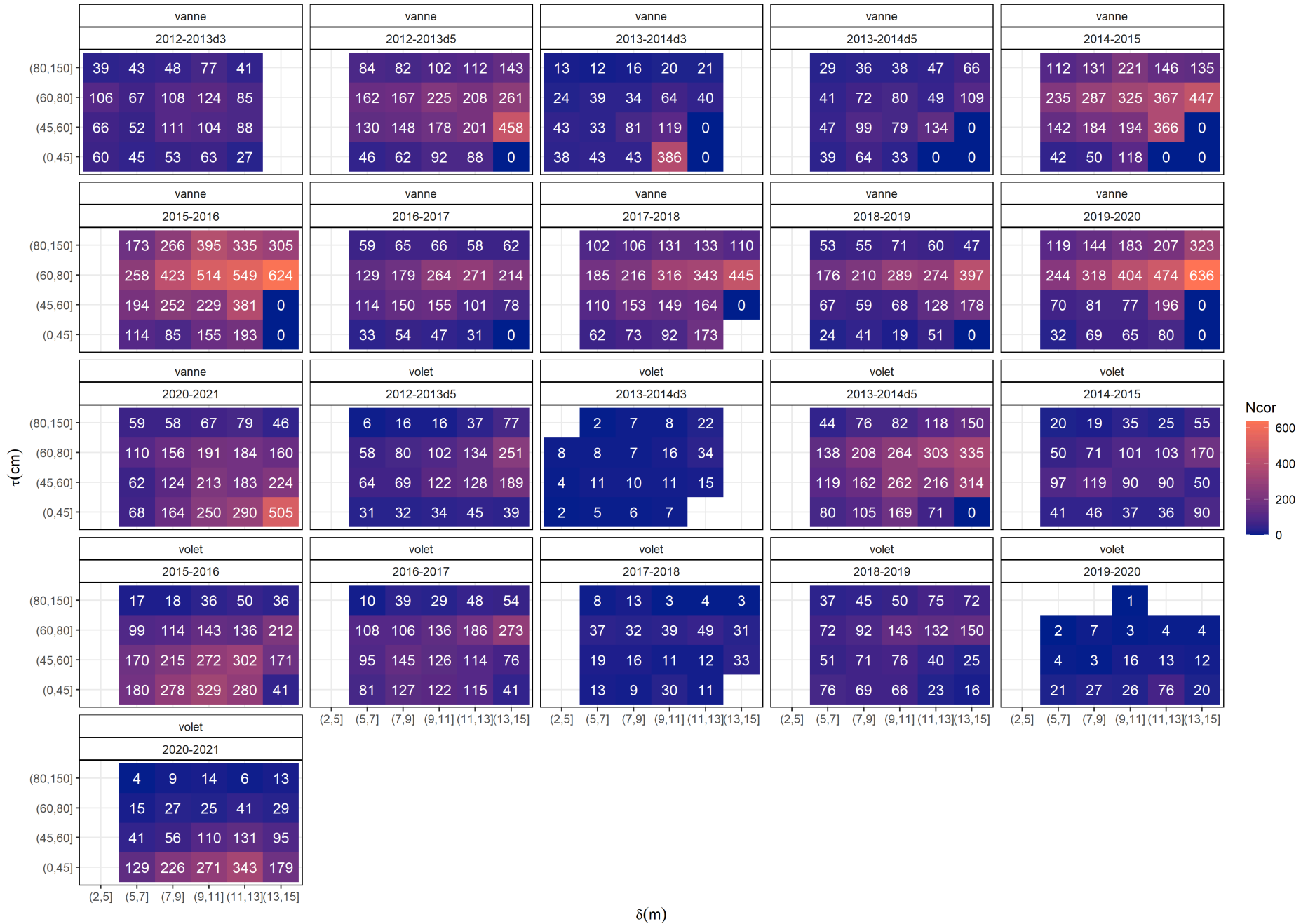


FIGURE 57 – Effectif recalculés après correction. En théorie les effectifs devraient augmenter. Il n'est pas toujours possible d'extrapoler les effectifs pour la classe de distance la plus grande, car il n'y a alors plus de détections.

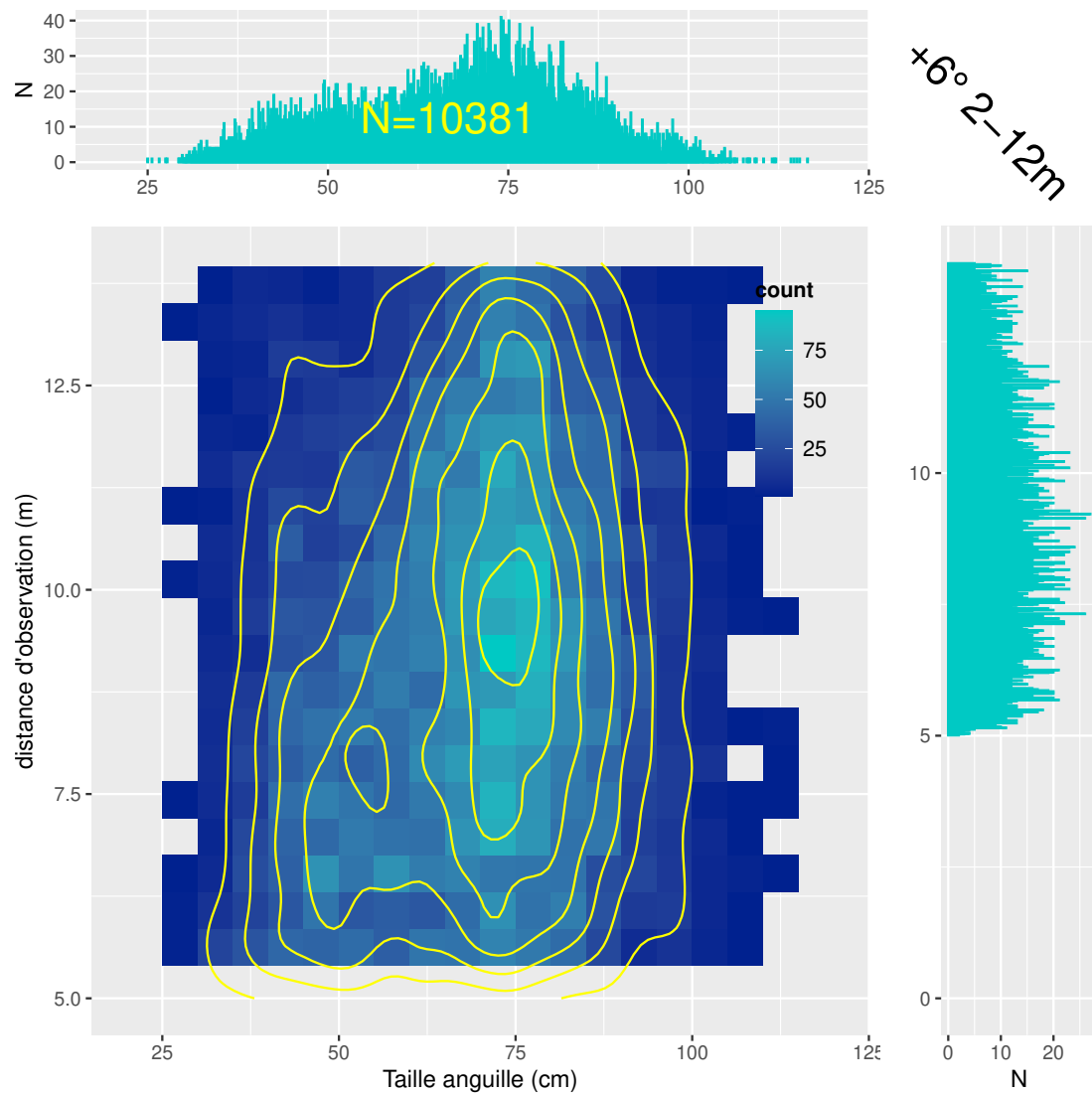


FIGURE 58 – Taille des anguilles en fonction de la distance au sonar en vannes. Couleur en fonction du nombre d'observations par carré. Les polygones d'isodensité permettent de mettre en évidence la relation distance - taille (les plus petites anguilles ne sont visibles que près du didson). Les données correspondent à toutes les anguilles enregistrées depuis 2012 pour une position du didson au fond.

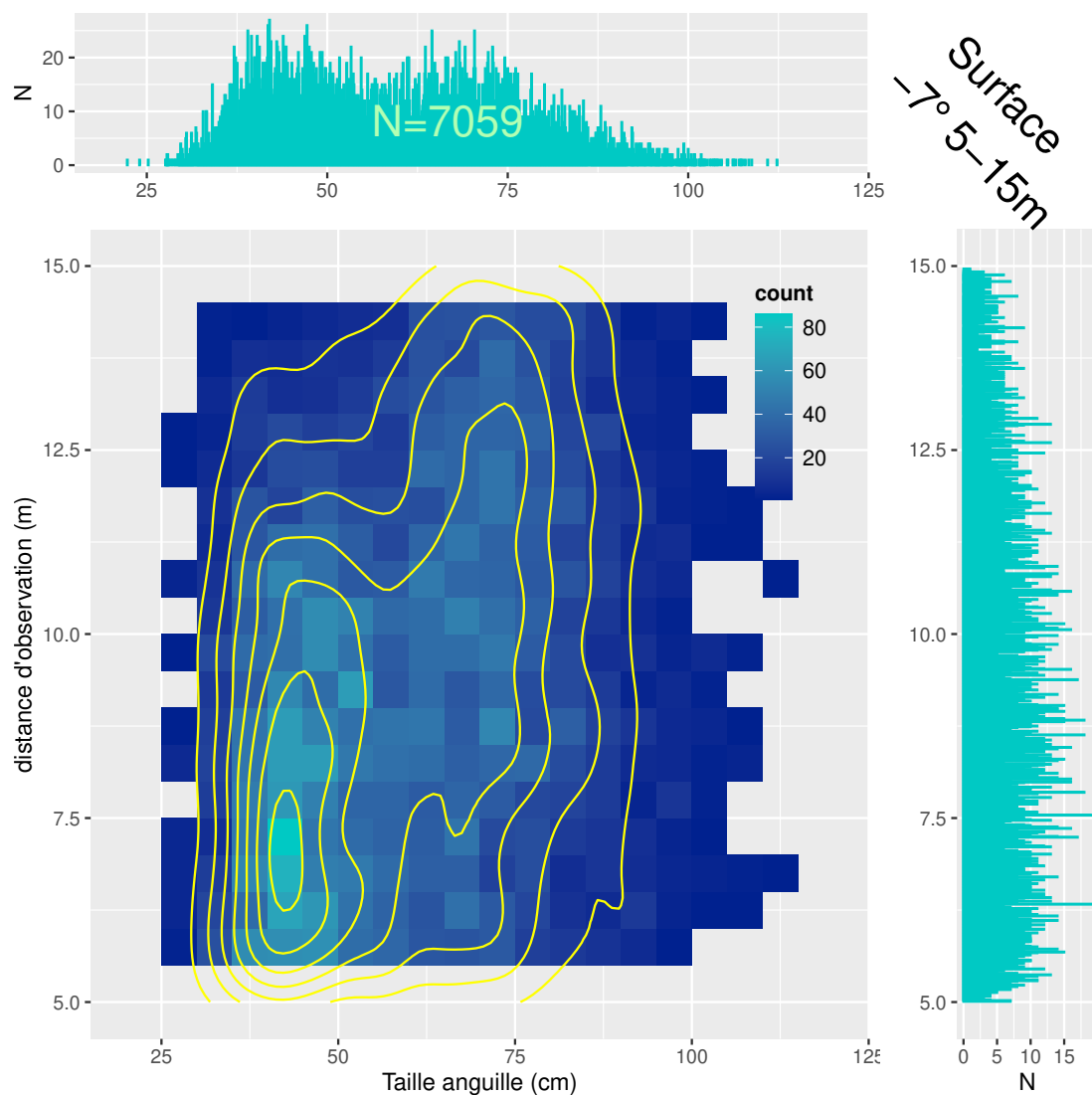


FIGURE 59 – Taille des anguilles en fonction de la distance au sonar en volets. Couleur en fonction du nombre d'observations par carré. Les polygones d'isodensité permettent de mettre en évidence la relation distance - taille (les plus petites anguilles ne sont visibles que près du didson). Les données correspondent à toutes les anguilles enregistrées depuis 2012 pour une position du didson en surface.

TABLEAU 14 – Efficacités moyennes calculées lors des précédents rapports pour les différentes positions du didson pour les 7 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

Références

- ACOU, A. et al. (2010). *Estimation Du Potentiel Reproducteur En Anguilles Argentées de La Loire Amont : Saisons de Migration 2001-05 à 2008-09*. CRESCO, Dinard - Muséum National d'Histoire Naturelle, p. 40.
- BILOTTA, G. S. et al. (2011). "The Decline of the European Eel *Anguilla Anguilla* : Quantifying and Managing Escapement to Support Conservation". In : *Journal of fish biology* 78.1, p. 23-38.
- BRIAND, C., B. SAUVAGET et G. ERIAU (2018a). *Suivi de La Dévalaison d'anguilles Argentées En 2015-2016 (Quatrième Année) Sur La Vilaine à l'aide d'un DIDSON*. EPTB Vilaine.
- (2018b). *Suivi de La Dévalaison d'anguilles Argentées En 2016-2017 (Cinquième Année) Sur La Vilaine à l'aide d'un DIDSON*. EPTB Vilaine.
- BRIAND, C., L. BEAULATON et al. (2015). *Eel Density Analysis (EDA 2.2) Estimation de l'échappement En Anguilles Argentées (Anguilla Anguilla) En France. Rapport 2015*. La Roche Bernard : ONEMA- EPTB Vilaine, p. 97.
- BRIAND, C., M. MARTINS et S. LANGLO (2017). *Organisation et Animation Technique Des Journées Techniques, Monitoring Anguille*. La Roche Bernard : Institution d'Aménagement de la Vilaine, p. 98.
- BRIAND, C., B. SAUVAGET et G. ERIAU (2014). *Suivi de La Dévalaison En 2012-2013 Sur La Vilaine*. La Roche Bernard : Institution d'Aménagement de la Vilaine, p. 27.
- (2015). *Suivi de La Dévalaison En 2013-2014 Sur La Vilaine à l'aide d'un Didson*. La Roche Bernard : EPTB Vilaine, p. 34.
- (2016). *Suivi de La Dévalaison d'anguilles Argentées En 2014-2015 (Troisième Année) Sur La Vilaine à l'aide d'un DIDSON*. La Roche Bernard : EPTB Vilaine, p. 27.
- (2019). *Suivi de La Dévalaison d'anguilles Argentées En 2017-2018 (Sixième Année) Sur La Vilaine à l'aide d'un DIDSON*. EPTB Vilaine, p. 30.
- (2020). *Suivi de La Dévalaison d'anguilles Argentées En 2018-2019 (Septième Année) Sur La Vilaine à l'aide d'un DIDSON*. EPTB Vilaine, p. 33.
- (2021). *Suivi de La Dévalaison d'anguilles Argentées En 2019-2020 (Huitième Année) Sur La Vilaine à l'aide d'un DIDSON*. EPTB Vilaine, p. 39.
- BRIAND, C. et S. WOIMANT (2015). *Note Sur Le Calcul Des Débits à Arzal*. La Roche Bernard : Institution d'Aménagement de la Vilaine, p. 11.
- CONWAY, J. et al. (2021). *RPostgreSQL : R Interface to the 'PostgreSQL' Database System*. manual.
- GROTHENDIECK, G. (2017). *Sqldf : Manipulate r Data Frames Using SQL*. manual.
- JOUANIN, C. et al. (2012). *Eel Density Analysis (EDA2.x) : Un Modèle Statistique Pour Estimer l'échappement Des Anguilles Argentées (Anguilla Anguilla) Dans Un Réseau Hydrographique*. Bordeaux, FRANCE : IRSTEA, p. 114.
- LANGKAU, M. C. et al. (2012). "Can Acoustic Shadows Identify Fish Species? A Novel Application of Imaging Sonar Data". In : *Fisheries Management and Ecology* (). ISSN : 1365-2400.
- MURDOCH, R. D. P. w. c. f. D. et B. R. G. l. b. A. MURTA (2020). *Gpclip : General Polygon Clipping Library for r*. manual.
- ZEILEIS, A., D. MEYER et K. HORNIK (2007). "Residual-Based Shadings for Visualizing (Conditional) Independence". In : *Journal of Computational and Graphical Statistics* 16.3, p. 507-525.

Remerciements

Les principaux remerciements, vont au personnel d'exploitation du barrage d'Arzal, Gilbert Olivier, Laurent Philippot, Thierry Besnard, Johann Dalhem, Alban Leguen, Cyril Faucon pour leur aide au quotidien. Cette étude a été financée par l'Agence de l'eau Loire Bretagne.

Rapport \LaTeX

Dernière compilation le 3 mars 2022

version R 4.1.2