



VOILET POISSONS MIGRATEURS 2015-2021

Suivi de la dévalaison
d'anguilles argentées en
2019-2020 (huitième an-
née) sur la Vilaine à l'aide
d'un didson.



Anguille d'été
(© G. Gernis, BGM)



Saumon mâle (© G. Gernis, BGM)



Anguille d'été (© F. D. S.)



Lampiro d'été
(© F. D. S., F. D. S.)



Lampiro d'été (© A. Langlais, Syndicat H. M.)



Date d'édition :

Janvier 2021

Réalisé avec le concours de :



Soutiennent les actions du volet "poissons migrateurs" :



Cédric Briand
Brice Sauvaget
Gérard Erian

Suivi de la dévalaison d'anguilles argentées
en 2019–2020 (8ème année)
sur la Vilaine à l'aide d'un didson.

Cédric Briand, Brice Sauvaget, Gérard Eriau

3 janvier 2022

Résumé

Les dévalaisons d'anguilles argentées ont été suivies, pour la huitième 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 huit années, 16 976 anguilles argentées ont été comptées lors des dépouillements. En 2019-2020, 1 434 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. 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 ($N=1\ 116$), ont été extrapolés à l'ensemble des vannes ($N=81\ 168$). Lorsque le didson est mal placé, les effectifs sont estimés à partir des densités du jour même ($N=27\ 806$). 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 ($N=420$). L'estimation quantitative de la dévalaison sur la Vilaine, sur la période de suivi, s'établit à ($N=99\ 086$) soit 70.9 tonnes. Les tendances interannuelles de cette migration sont détaillées dans le rapport (baisse, puis possible augmentation).

Abstract

Silver eel migrations were monitored, for the eighth 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 eight years, 16 976 silver eels were counted during the readings. In 2019-2020, 1 434 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 ($N = 1\ 116$), have been extrapolated to all gates ($N = 81\ 168$). When the didson is in the wrong position, numbers are estimated from densities of the same day ($N = 27\ 806$). 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 ($N = 420$). A quantitative estimation of downstream migration on the Vilaine, over the monitoring period is established at ($N = 99\ 086$) or 70.9 tonnes. The interannual trends of this migration are detailed in the report (decrease, then possible increase).

Mots clés : 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	3
1.3	Automatisation de la position verticale du didson	4
1.4	Suivi des migrations	4
1.5	Mesure des conditions environnementales	6
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	11
2	Résultats	11
2.1	Suivi	11
2.1.1	Fonctionnement du barrage	11
2.1.2	Dépouillement des fichiers	12
2.1.3	Problèmes dans le suivi	13
2.1.4	Positionnement du didson	13
2.1.5	Qualité des images	15
2.2	Taille des anguilles et efficacité	15
2.2.1	Calcul de l'efficacité	17
2.3	Migration	18
2.3.1	Migration en fonction du cycle nycthéral	18
2.3.2	Comportement de migration	18
2.3.3	Biomasses et sexe ratios	19
2.3.4	Estimation des effectifs migrants	20
2.3.5	Prédiction pour les données manquantes	20
3	Discussion	21
3.1	Migration	21
3.2	Biais et précision	21
3.2.1	Confusion avec d'autres espèces	21
3.2.2	Taille des anguilles	22
3.2.3	Efficacité moyenne	22
3.3	Synthèse inter-annuelle	22
4	Annexes	24
4.1	Comptage par positions	24
5	Notations	26

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 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 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 dé-

valantes 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 2019-2020. Les résultats sont comparés aux résultats des saisons 2012-2013, 2013-2014, 2014-2015 2015-2016, 2016-2017, 2017-2018 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).

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.

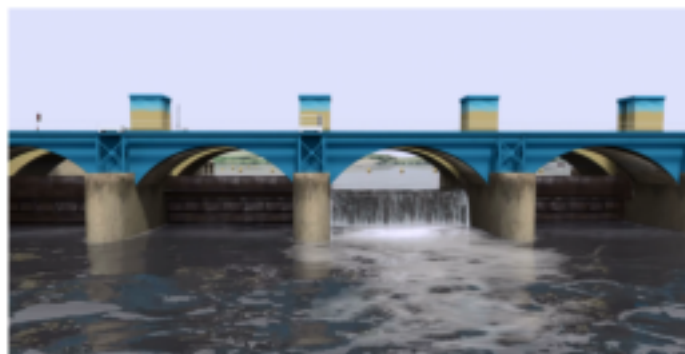


FIGURE 2 – Vue montrant un écoulement sur le volet 4 à partir de l’aval du barrage.

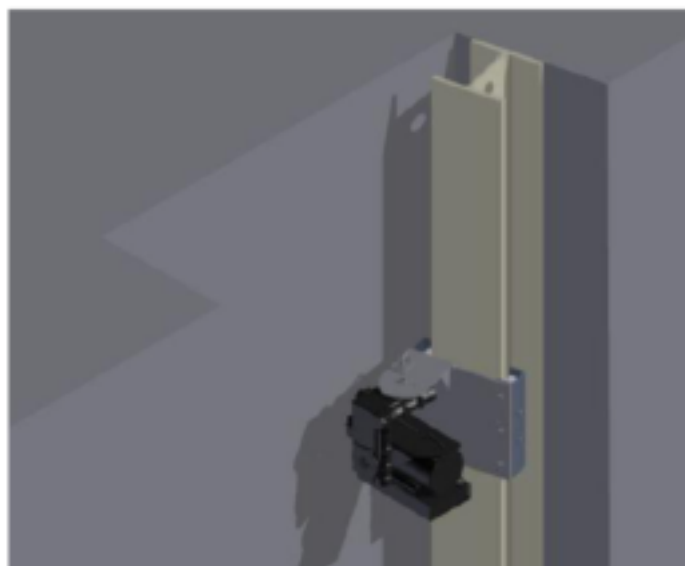


FIGURE 3 – Positionnement du didson dans l’échancrure de batardage de la vanne. Le didson est placé à l’abri des corps dérivants.

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 V5.25.35 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 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



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).

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 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,

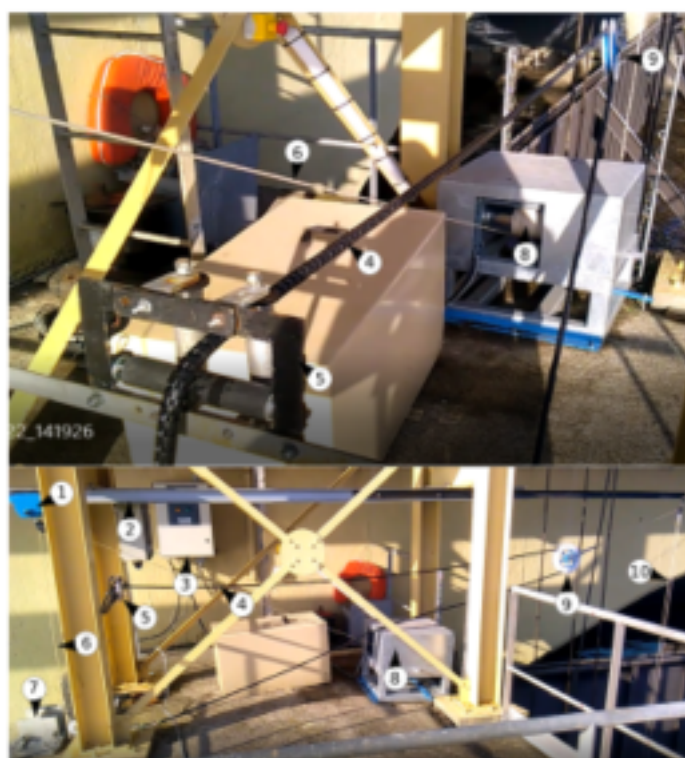


FIGURE 7 – Automatisation de la position verticale du didson. 1 chariot sur poutre HEB, 2 rail, 3 coffret électrique comprenant les éléments de contrôle de l'automate, 4 câble du didson (alimentation et signal) renforcé par une gaine, 5 guide câble, 6 câble de traction du didson, 7 poutre HEB du chariot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

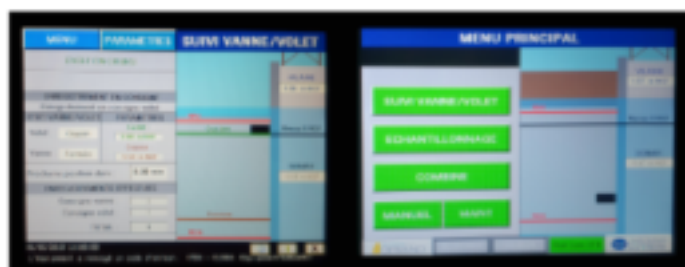


FIGURE 8 – Ecrans de contrôle et de programmation de la position du didson

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.

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 38). Cette situation intervient cependant après plusieurs pics de crue et il est probable que l'essentiel de la migration ait eu lieu.

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 $m^3 \cdot s^{-1}$).
3. Des débits transitant par la passe à poissons.

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

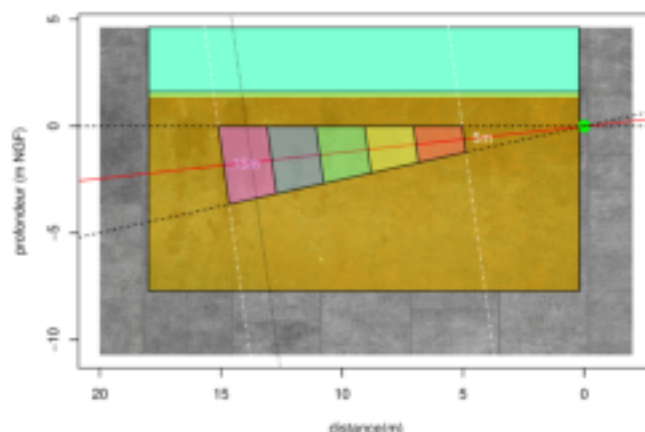


FIGURE 9 – Schéma montrant la position du didson et la fenêtre d'échantillonnage couverte par l'appareil lorsque celui-ci est placé 1 m sous la surface (-7°) pour détecter les anguilles migrant sur le volet. Les polygones de couleur représentent les différentes sections d'échantillonnage en fonction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

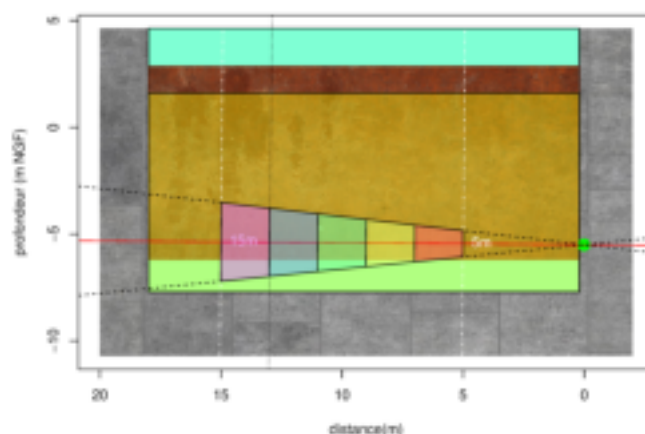


FIGURE 10 – Fond 0° 5-15m, didson placé à 5.5 m de profondeur lorsqu'il alterne entre des positions au fond et en surface à l'aide du positionnement géré par l'automate. Le didson échantillonne 14.8% de la fenêtre de passage supposée.

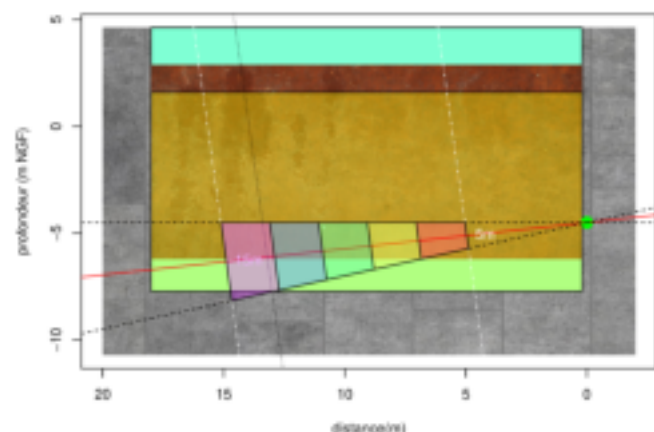


FIGURE 11 – Fond -7° 5-15m, Didson placé à 4.5 m de profondeur avec un angle de -7°. Par rapport à la position en Figure 10 le didson est remonté. L'angle de -7° permet d'éviter les échos sur la surface lorsque le didson est remonté en position haute par l'automate. Le didson échantillonne 14.6% de la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

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 recalculés au droit du barrage d'Arzal car les formules de débit utilisées étaient

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.

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).

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).

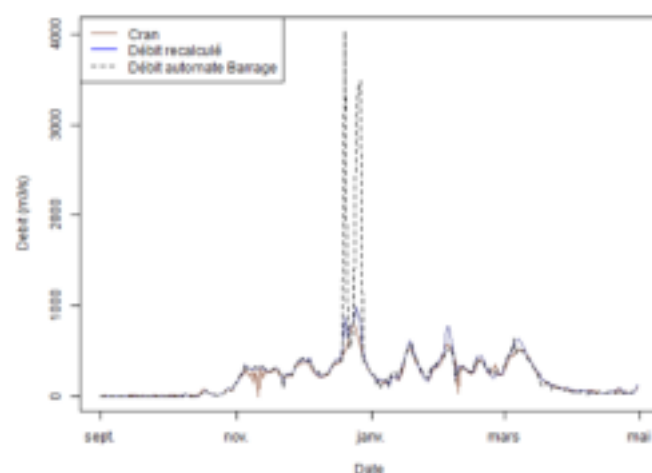


FIGURE 12 – Débits recalculés en 2019-2020. Comparaison des débits mesurés au niveau de la station de Rieux (Pont de Cran - station hydrométrique), des débits calculés par l'automate du barrage d'Arzal et des débits recalculés par la méthode de Briand et Woimant (2015). La saison de suivi s'étend de septembre 2019 à fin avril 2020.

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). Le pertuis 2 a été très peu utilisé en raison d'un mauvais état de la vanne, dont les travaux sont prévus pour 2021.

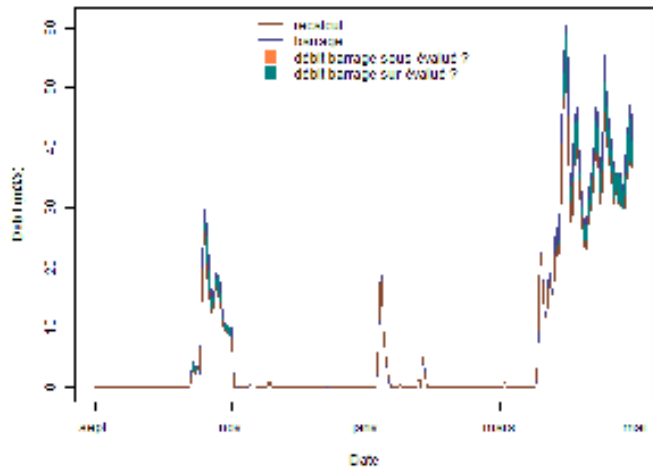


FIGURE 13 – Comparaison des valeurs produites par l’automate du barrage et des valeurs obtenues après correction de la dérive des codeurs. Les formules de débits des volets ont été recalées mais donnent à peu de choses près les mêmes débits avec des formules de débit différentes (Briand et Woimant, 2015).

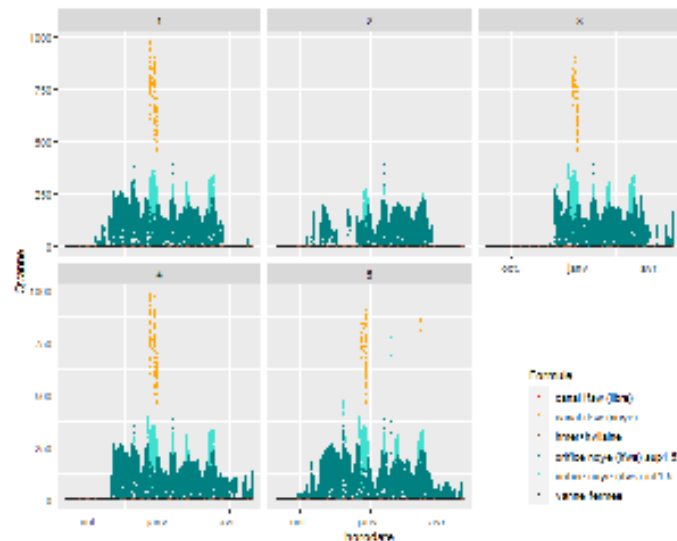


FIGURE 14 – Débits de chacun des pertuis de vanne pour l’hiver 2019–2020 en fonction des différents types d’écoulement calculés sur chaque vanne Briand et Woimant (2015).

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 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 2.5 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 :

- $\leftrightarrow$ 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 (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 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 2019-2020.

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

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

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

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

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 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 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. 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) :

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

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 vanne 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 : $\tau = > 80\text{cm}, k = \text{surface}$. En outre, les données sont analysées sur les détections de toutes les saisons (Figures 27b, 27c).

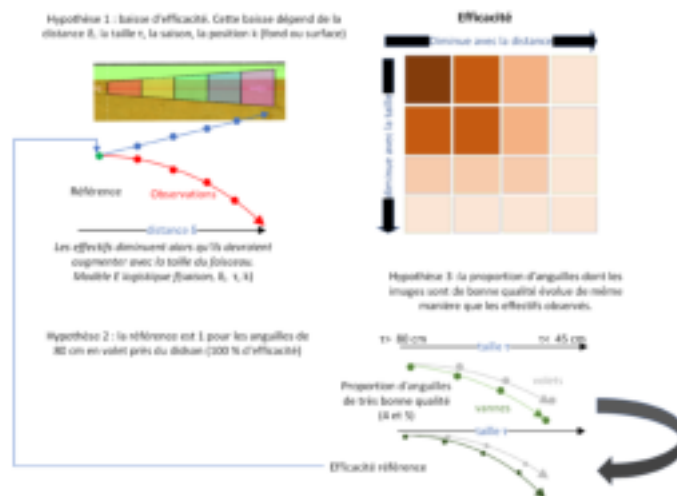


FIGURE 15 – Diagramme schématisant le calcul de l'efficacité.

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 $>80\text{cm}$.

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 séparation 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).

$$E(\delta, \tau, k) = \min(1, b_0 + b_1\tau + b_2\delta + b_3k + b_4\delta : k + b_5\tau : k + b_6\text{saison}) \quad (7)$$

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 $\rho(k) = 1$.

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

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

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 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 vo-

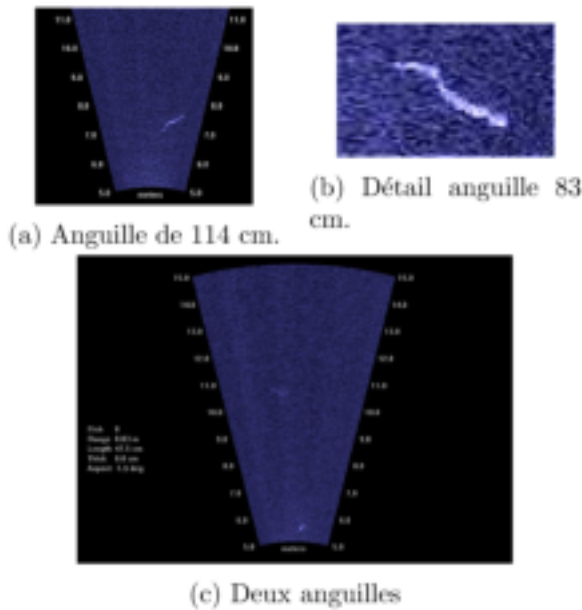


FIGURE 16 – Anguilles en dévalaison filmées par le didson.

let (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.

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

1.8.5 Modélisation de la migration

En 2019-2020 le dépouillement des fichiers a débuté le 19 octobre. 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 est a connu quelques ouvertures nocturnes avant la mise en place du Didson le 19 octobre (Figures 17 et 18). C'est la première année depuis 2013–2014 que l'on retrouve un pic de débit à $1\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Les turbidités montent au-delà de 50 NTU au cours des 5 pics de crue (Figure 17).

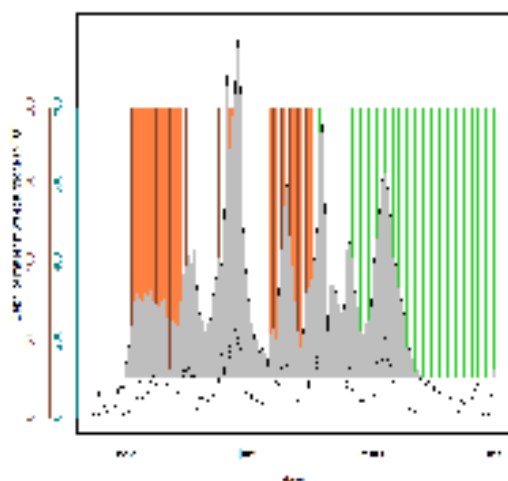


FIGURE 17 – Débit de la Vilaine ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ —) et turbidité (NTU, ---) pendant la période de migration. En ■ débits corrigés (moyennes journalières). En fond, problèmes de fonctionnement du sonar, en vert ■ erreurs ponctuelles d'acquisition, en orange, ■ problèmes de qualité, voir aussi la figure 36 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 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 15 jours contre 1 mois pour la saison précédente (Tableau 1). Ce temps plus limité est lié au sectionnement du câble le 19 février. Le suivi sur site du fonctionnement du didson correspond à 70 contrôles.

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

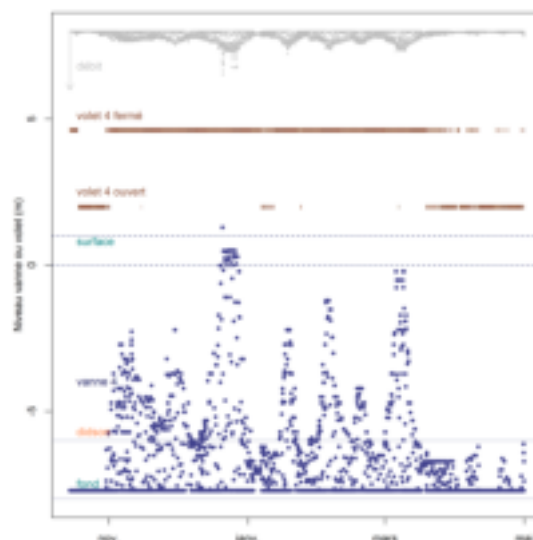


FIGURE 18 – Fonctionnement du barrage, ouverture de la vanne 4 et du volet 4 et débit de la Vilaine pendant la période de migration. Chaque point correspond à une valeur pendant 30 minutes.

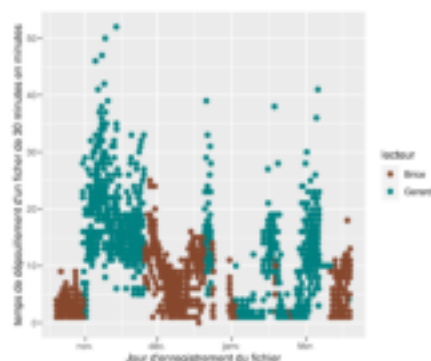
TABLEAU 1 – Temps de dépouillement des fichiers didson en 2019-2020. Les temps donnés ne correspondent qu'au temps passé au dépouillement.

mois	temps
10	16 :43 :00
11	6 jours 23 :32 :00
12	3 jours 01 :33 :00
1	1 jour 18 :11 :00
2	2 jours 16 :17 :00
total	15 jours 04 :16 :00

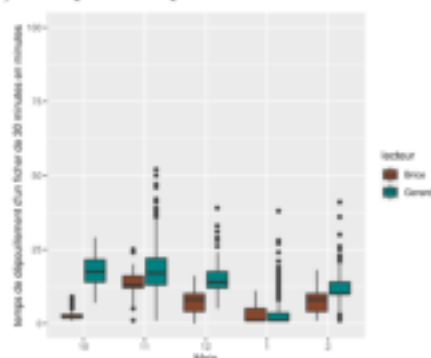
année comme les autres, les fichiers ont été vérifiés grâce à la double inscription des dépouillements, à la fois dans un fichier excel, et après traitement des fichiers textes comprenant les données poisson.

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 un facteur limitant pour le comptage. Ils disparaissent en hiver avant de réapparaître en mars (Figures 20, 21 et 37).

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.



(a) Temps de dépouillement en 2019-2020.



(b) BoxPlot des temps de dépouillement en 2019-2020.

FIGURE 19 – Temps de dépouillement, distribution et boxplot.

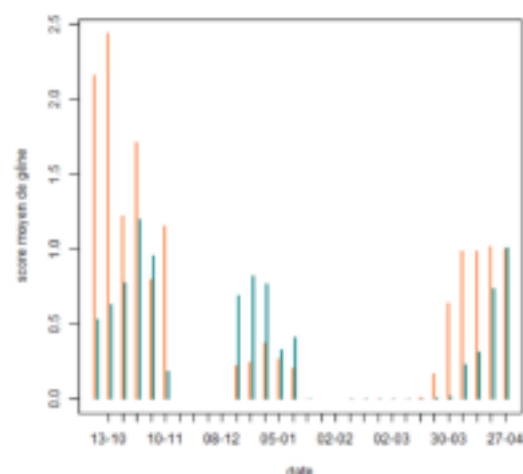


FIGURE 20 – Histogramme montrant la présence de mulets (—) et d'alevins (—) dans les comptages, les valeurs sont agrégées sous forme de moyenne à partir de scores allant de 0 (pas de poissons) à 5 (poissons très gênants pour le comptage).

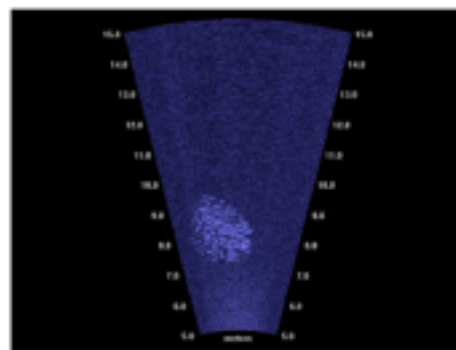


FIGURE 21 – Banc d'alevins le 24 avril 2015.

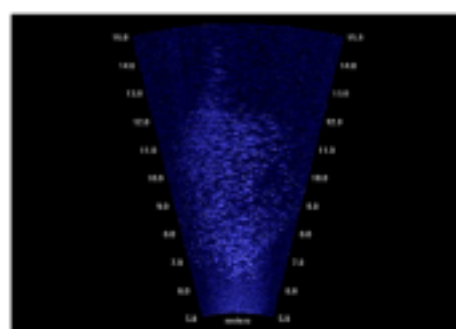


FIGURE 22 – Banc d'alevins le 26 avril 2015.

2.1.3 Problèmes dans le suivi

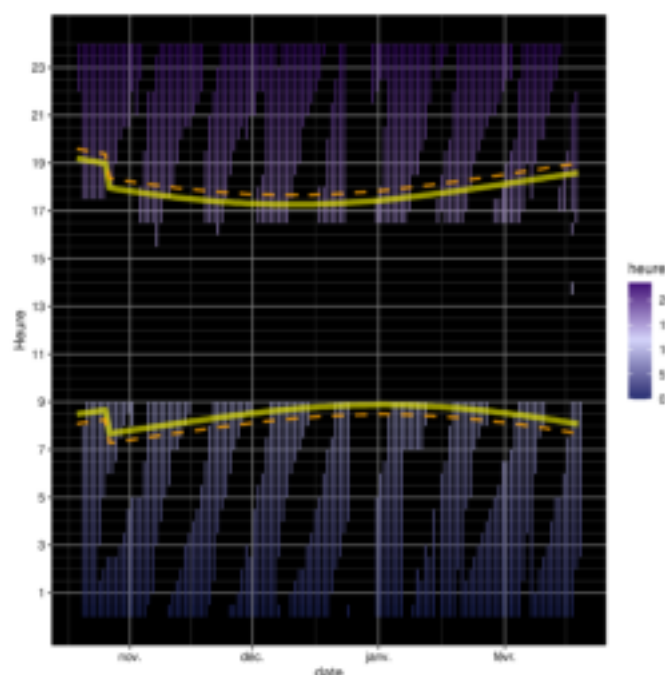


FIGURE 23 – Heures de début et de fin des fichiers dépouillés, et heures de lever et de coucher du soleil (en jaune). Les rectangles bleus à violet correspondent à des horaires de fichiers dépouillés, en noir pas de dépouillement, en orange début et fin des durées de pénombre civiles correspondant à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

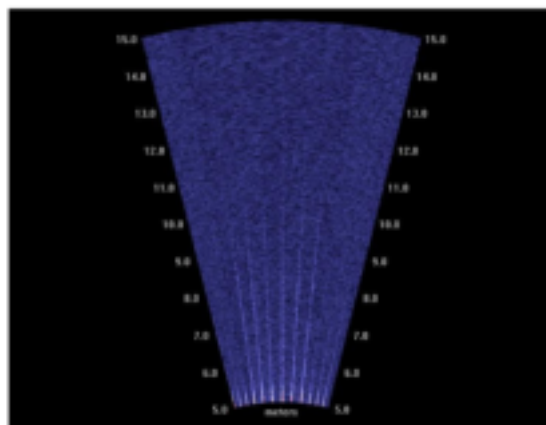


FIGURE 24 – Flash du didson

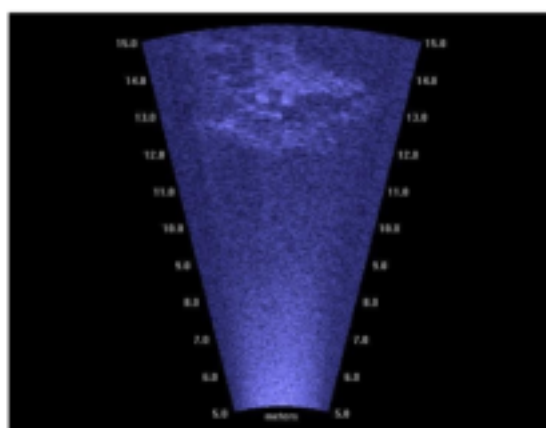


FIGURE 25 – Echo du didson à la surface.

L'ensemble des problèmes techniques sont résumés sur les Figures 17, 36 pour le détail par 30 minutes, et 51 pour le graphique saisonnier.

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 29.0% du temps,
- Dans tous les autres cas, la vanne est ouverte

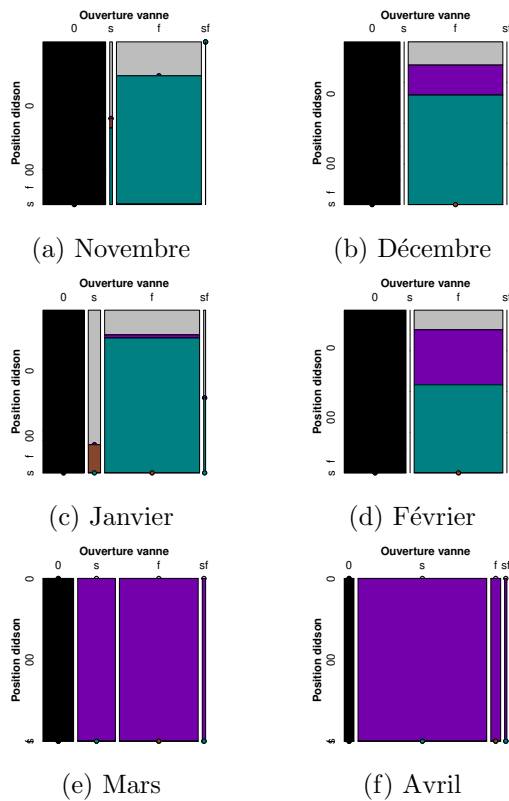


FIGURE 26 – Position du didson et de la vanne 4, taille des rectangles relative au nombre d’occurrences d’un type de positionnement de vanne et d’un type de positionnement didson pour chaque mois. En lignes, positionnement du didson, 0 = pas de lecture, s = surface (Figure 9), f=fond (Figure 10). En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

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	2675	430	116
1	1	0	2505
3	640	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, f3 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.

	f3	f5	n	s	sl
0	3255	17813	201	16826	414
1	95	813	4808	669	56
2	254	466	63	136	10
3	431	1265	0	348	0

- le didson n’a pas pu être positionné (problèmes techniques) 9.0% du temps, (rectangles **violet**),
- le didson fonctionne, il est bien positionné 31.0% 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 0.0% du temps,
- les fichiers du didson n’ont pas été lus, ou le didson n’a pas fonctionné pendant 31.0% du temps (zones **grises**).

Cette année le positionnement du didson a été bien adapté sur la période de suivi. Les problèmes d’enregistrement au pic des crues et après la détérioration du câble en mars et avril sont par contre très importants. (Figures 26b 26d 26e et 26f - en violet, Figure 51 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 9% du temps. Le *positionnement* du didson par rapport aux ouvertures au fond ou en surface est correct 31% du temps. La vanne 4 (ou le volet 4) sont fermés 29% 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.

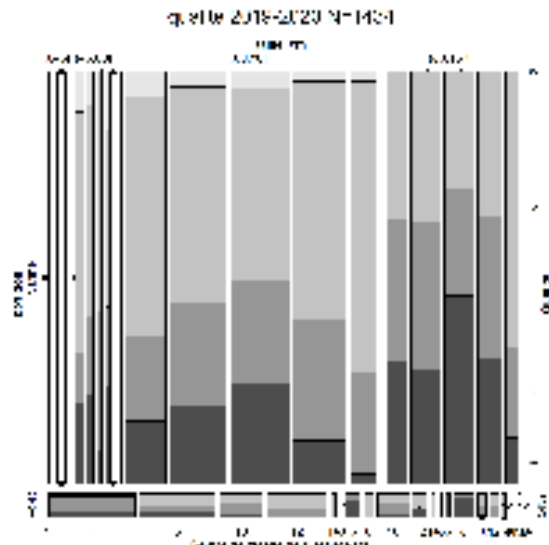
Les données rassemblées sur les saisons donnent un diagramme très cohérent pour le classement de la qualité des images (Figures 27b, 27c),

- 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 2019-2020 les détections sont essentiellement 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. Les moins bonnes qualités d'anguilles détectées dans les deux premières classes de distance montrent des effectifs plus faibles d'anguilles de très bonne (5) et bonne qualité (4). Le faisceau est moins large pour les anguilles de ces deux premières classes de distance et la détection des anguilles est basée sur moins d'images. Avec la vitesse du courant en vannes en conditions de crue, il est plus difficile d'avoir des anguilles de bonne qualité que plus loin sur le faisceau.

2.2 Taille des anguilles et efficacité

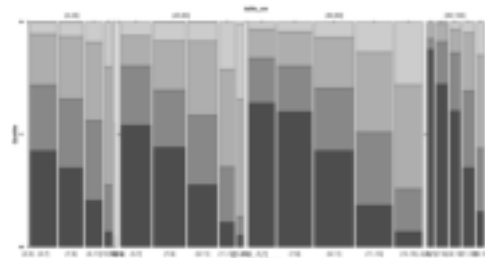
L'analyse de l'efficacité a été conduite sur l'ensemble des anguilles détectées (16 976) en fonction de la distance au didson et de la taille des anguilles. Les anguilles de plus petite taille sont clairement moins détectées loin du didson (Figures 28, 29). La corrélation entre la taille des anguilles mesurées et la distance d'observation est significative (Pearson $\text{cor}=0$, $p<0.001$) (Figure 30).



(a) 2019-2020

N=1434

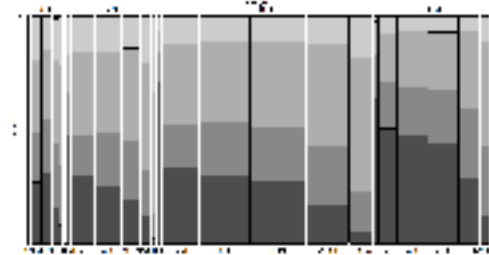
Volets



(b) surface

$\delta=5-15\text{m}$

N=6242



(c) fond

$\delta=5-15\text{m}$ N=10734

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.

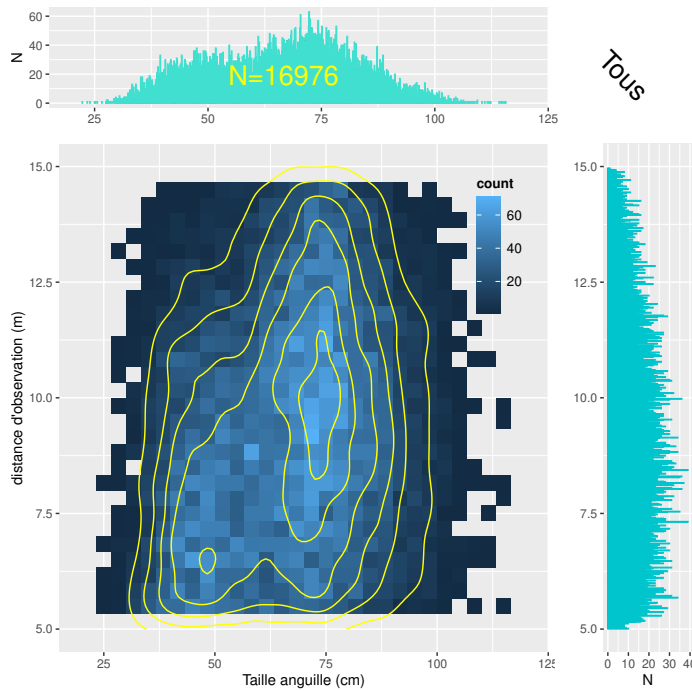


FIGURE 28 – Taille des anguilles en fonction de la distance au sonar. Couleur en fonction du nombre d’observations par carré. Les polygones d’isodensité permettent de mettre en évidence la relation distance - taille (les plus petites anguilles ne sont visibles que près du didson). Les données correspondent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

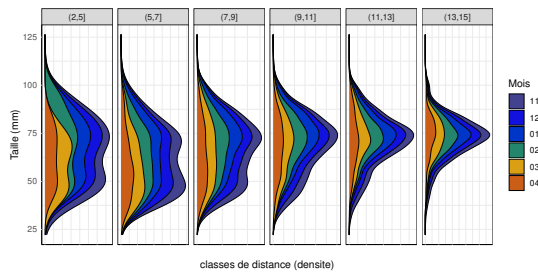


FIGURE 29 – Structure de taille des anguilles en fonction de la distance au sonar et du mois pour l’ensemble des saisons de suivi depuis 2012-2013.

L’effet est moins apparent cette saison car les détections ne se font qu’en vannes dans des conditions où il est difficile de détecter les anguilles de plus petites classes de tailles (Figures 28, 30).

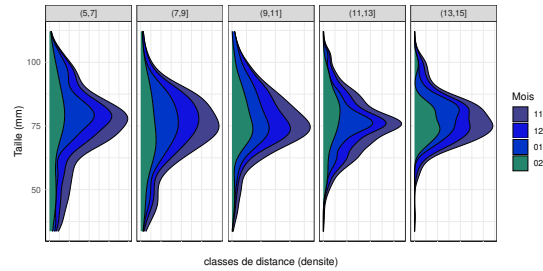


FIGURE 30 – Structure de taille des anguilles en 2019-2020 en fonction de la distance au sonar et du mois.

Les tailles changent aussi en fonction de la période (Test χ^2 $p < 0.001$). 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 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 petites tailles (mâles < 45 mm) début de saison (Figure 31). *A contrario*, les anguilles des 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 4). 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 taille.



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 et al., 2007).

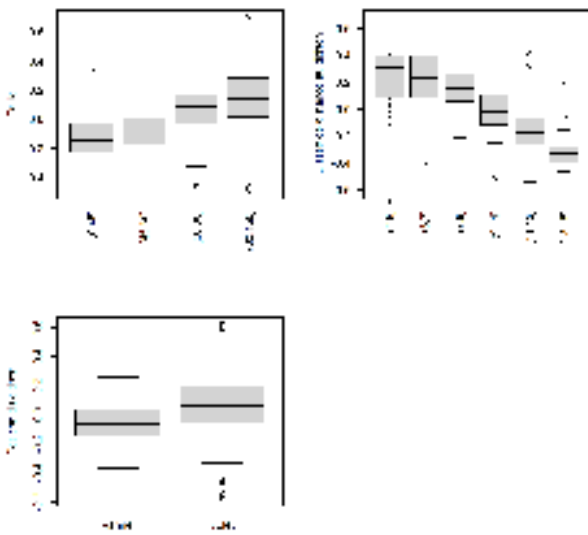


FIGURE 32 – Prédictions et résidus de la modélisation linéaire de l'efficacité du didson, en fonction de la taille et de la distance au didson, pour les deux positions du sonar en fin de saison. Attention il existe en plus une interaction entre la taille et la distance, cet effet est ignoré ici.

TABLEAU 4 – Analyse de variance du modèle logit des efficacités. τ = taille, δ = distance au didson

	df	dev.	res. df	res. dev.	$P(>\chi^2)$
Resid.			371	30.2	
δ	5	12.96	366	17.2	<0.001
τ	3	3.96	363	13.3	<0.001
saison	9	1.59	354	11.7	<0.001
k (position)	1	1.13	353	10.5	<0.001
$\delta * \tau$	15	2.06	338	8.5	<0.001

L'efficacité moyenne (Formule 8) est de 44% en surface et 36% en position fond.

Pour l'ensemble des années, les diminutions d'effectifs en fonction de la distance au didson sont résumées en figure 52 les efficacités sont calculées en figure 53 et les nombres corrigés issus du recalcul sont présentés en figure 54 et 53 (les trois figures sont en annexe).

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 94 journées pour lesquelles le suivi a été effectué au delà de ces heures. Le pourcentage d'anguilles migrant de 9h30 à 17h30 est de $\mu=9.3^4$ (Figure 33a).

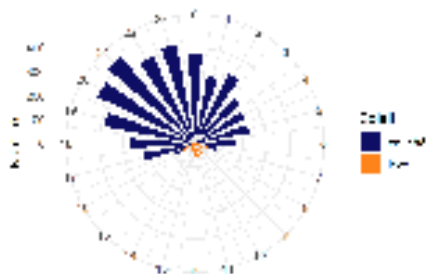
Sur les périodes sur lesquelles le dépouillement complet a été effectué, il n'est pas évident qu'il y ait un biais lié à des ouvertures du barrage plus importantes à certaines heures (Figure 33b).

Une modélisation prenant en compte le caractère circulaire des données conduit aux résultats Figure 33c avec un pic de passage vers 22 h Figure 33, Tableau 5.

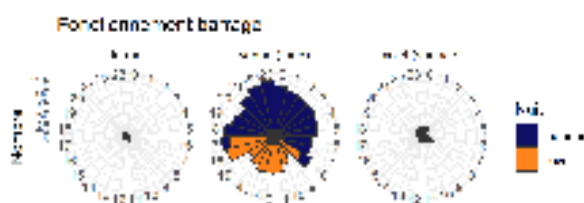
2.3.2 Comportement de migration

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 ($\chi^2 p=0$). Les anguilles en nage à contre

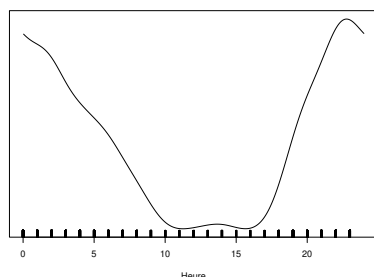
4. Les deux années 2013–2014 et 2014–2015, un coefficient de $\mu = 11.9\%$ avait été utilisé (Briand et al., 2015b, 2016), puis une valeur de 5.6 %.



(a) Horaires de passages toutes saisons



(b) heures de fonctionnement du barrage.



(c) modèle circulaire.

TABLEAU 5 – Répartition horaire des anguilles détectées au didson, nuit = suivi 1168 jours toute la saison entre 18h 00 et 9h00 , 24 h=répartition pour les 94 jours de suivi complet, 24 h cor= idem mais valeurs corrigées des ouvertures de vannes.

	24 h	24 h cor.	nuit
1	423	349	1555
2	378	338	1397
3	288	259	1094
4	323	312	1014
5	251	260	863
6	234	248	684
7	232	263	593
8	176	179	515
9	93	89	315
10	32	47	37
11	30	38	
12	47	53	
13	60	69	
14	61	70	
15	36	46	
16	40	58	
17	50	47	
18	92	82	
19	219	197	900
20	277	263	1260
21	387	377	1652
22	451	391	2215
23	480	377	2058
24	404	305	1739
Somme	5064	4717	17891

FIGURE 33 – Horaires de passage des anguilles en fonction de l’alternance jour nuit (voir Figure 33a), (a) pour les 94 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.

courant ont en effet une probabilité plus forte que les autres de rentrer dans le faisceau. La proportion d'anguilles effectuant une traversée complète (23%) 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 7).

TABEAU 6 – 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	InOut	Out
A	271	323	311	170
R	17	55	264	102
M	3676	4730	5070	1987

TABEAU 7 – 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=10734, N volet=6242.

	fond	surface
<->	29	14
In	28	33
InOut	31	37
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 716g. Les sexes ratios calculés en utilisant une limite de taille entre les mâles et les femelles à 450 mm (Acou et al., 2010) s'établissent à 8 % 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 716g pour la dévalaison 2019–2020.

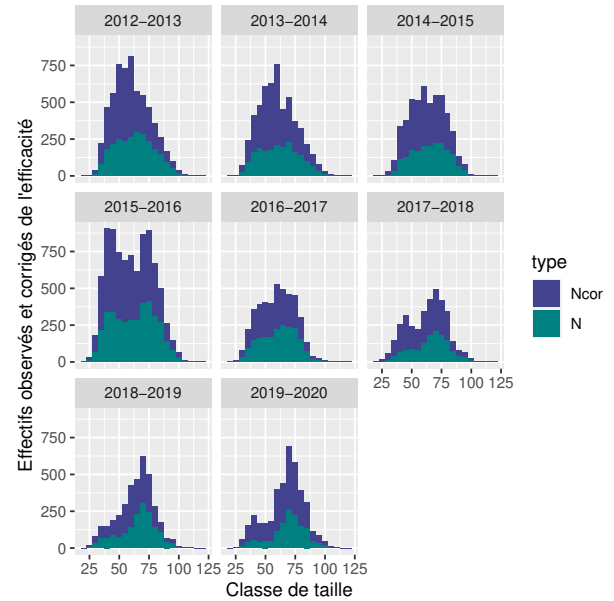


FIGURE 34 – Structure en taille des anguilles, en bleu foncé effectifs bruts, en vert effectifs corrigés de l'efficacité.

2.3.4 Estimation des effectifs migrants

Un total de 16 976 anguilles a été compté au didson sur l'ensemble de la période et 1 434 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 16 440 anguilles lorsqu'on ne sélectionne que les anguilles comptées entre 18 h et 8h . Puis il diminue encore à 14 980 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 ☉ correspondent à 40% 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 $N'_{\odot}(t, k)$ sont divisés par l'efficacité $E(k)$ et le facteur ρ pour obtenir les effectifs corrigés au droit du didson $N_{\odot}(t, k)$ 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 110 enregistrements ($\otimes$), contre 113 enregistrements en fonctionnement normal ($\odot$). Les effectifs extrapolés à partir des migrations observées le même jour est de $N_{\otimes}=420$ anguilles argentées.

Il y a eu cette année 199 journées avec aucun d'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 jours est estimée à $N = 27\,806$ anguilles argentées (Figure 35).

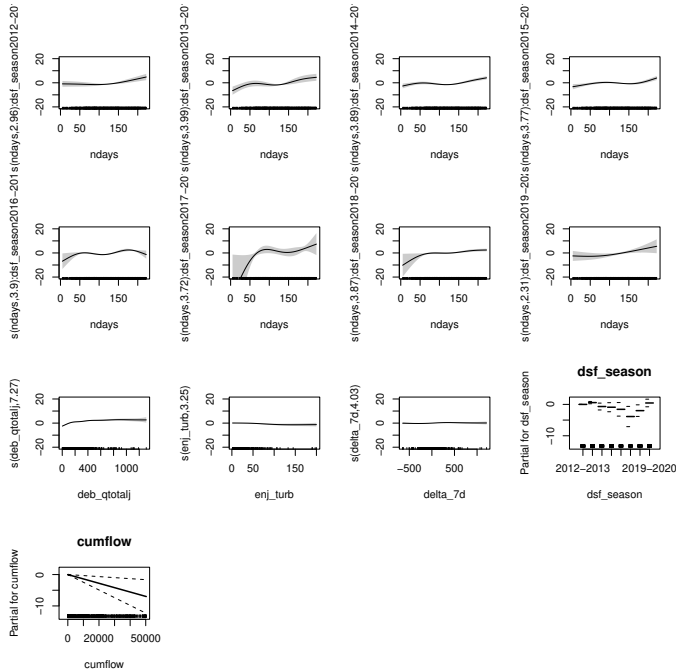


FIGURE 35 – Modélisation des effectifs manquants à l'aide d'un modèle gam (tendance saisonnière + effet saison + débit + cumul débit depuis le début de la saison) + turbidité + variation du débit à 7 jours (delta 7d).

Les différentes étapes de la reconstitution des effectifs sont résumées dans le tableau 11 et aboutissent à l'estimation d'un effectif de 99 086 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 70.9 tonnes.

La migration estimée par mois est présentée au tableau 12.

Les effectifs extrapolés à partir des données considérées comme fiables ($N_{\odot}=81\,168$), les effectifs modélisés pour les mauvaises configurations ($N_{\otimes}=420$) et les effectifs extrapolés pour les jours sans estimation ($N_{\oplus}=27\,806$) donnent une estimation quantitative partielle des effectifs d'anguilles argentées en dévalaison sur la Vilaine $N=99\,086$ soit 70.9 tonnes (Tableau 11).

3 Discussion

3.1 Migration

La huitième année de suivi des migrations à l'aide du didson correspond globalement à un très bon positionnement du sonar mais elle est marquée par la rupture du câble en fin de saison et l'arrêt des suivis. Compte tenu de l'importance des crues avant l'incident, la conséquence sur les effectifs est probablement minime. Chaque pic de débit se traduit par un pic de migration, les premiers pics correspondent aux migrations les plus fortes, de l'ordre de 5000 anguilles par jour.

Les effectifs recalculés durant les périodes d'arrêt d'enregistrement du didson 27 806 anguilles sont incertains et constituent presque un tiers des effectifs comptés. Le retour à des débits de crue décennales, semble augmenter les effectifs, cette tendance devra cependant être confirmée par les suivis ultérieurs (Tableau 10).

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 (Tableau 8). Cette

TABLEAU 8 – Nombre de lamproies marines comptées au didson en fonction des saisons de suivi. Entre parenthèse les lamproies en direction montante.

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

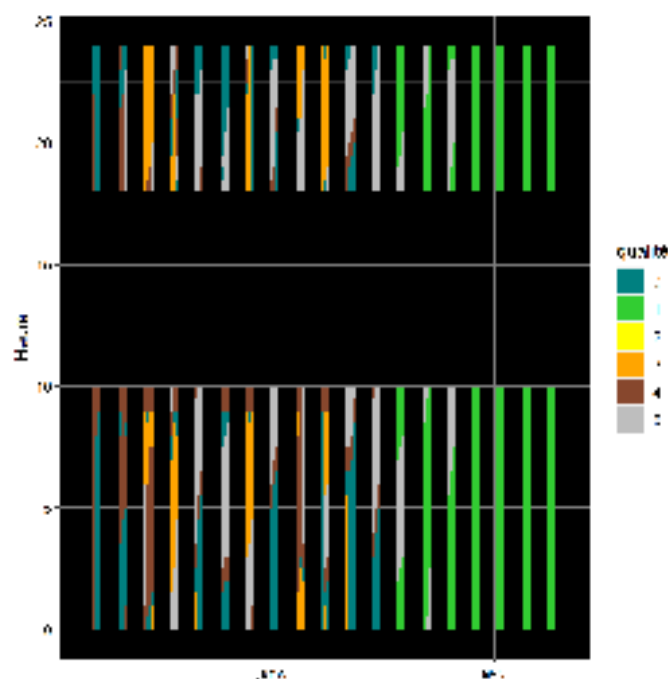


FIGURE 36 – Fonctionnement du didson. Les rectangles correspondent chacun à une période d'enregistrement, 0 ■ enregistrement normal, 1 ■ problème d'acquisition, 2 ■ problème d'écriture, 3 ■ problème de qualité, 4 ■ mauvais positionnement du didson ou écoulement ailleurs sur le barrage, 5 ■ vanne fermée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

tendance est conforme à la forte baisse de migration des lamproies marines observée sur la passe.

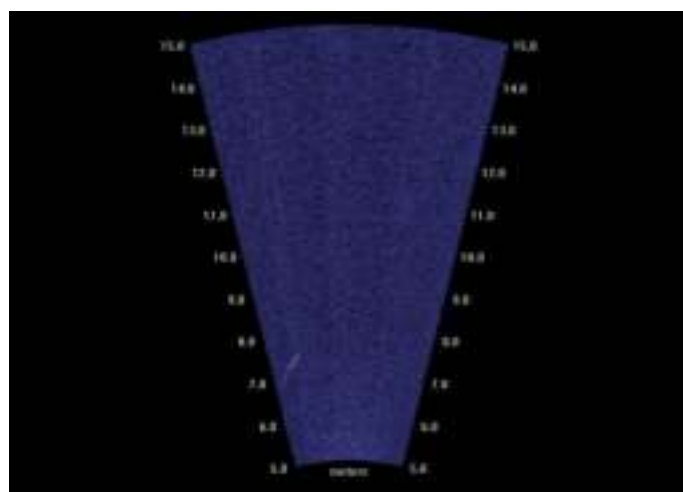


FIGURE 37 – Mulets ou anguille ?

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

Le recours à la qualité des images pour calculer l'efficacité de référence par classe de taille (100% d'efficacité pour les grandes anguilles en volet, moins que 10% pour les autres catégories ...) conduit à diminuer fortement les efficacités par rapport aux autres rapports (Tableau 9, Tableau 13 en annexe). L'efficacité en 2019-2020 est très faible⁵.

TABEAU 9 – 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	0.49
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	0.46
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

3.3 Synthèse inter-annuelle

Les effectifs par an ont été recalculés (Tableau 10 et Figure 39). 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 effectifs⁶.

5. on estime que seuls 36 % des effectifs d'anguilles sont détectés lors des suivis en vannes

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

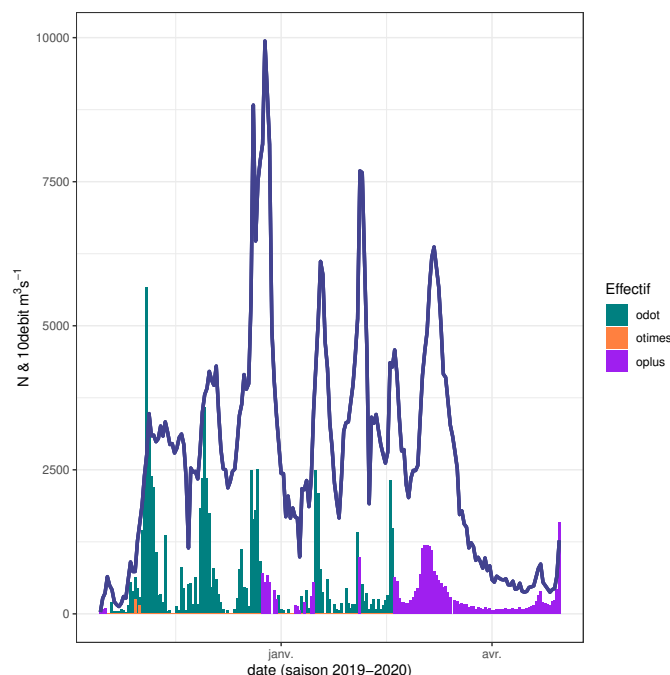


FIGURE 38 – Effectifs journaliers estimés sur l'ensemble du barrage, en turquoise (N) ⊙ = effectifs mesurés, en orange N ⊗ = effectifs extrapolés à partir de données de densité recueillies dans la journée. En mauve, N ⊕ = effectifs extrapolés à partir d'un modèle saisonnier. En bleu foncé —, débits journaliers estimés au barrage d'Arzal $m^3.s^{-1}$ (multipliés par 10 pour des raisons graphiques).

TABEAU 10 – Production en anguilles argentées de la Vilaine à partir des comptages au didson en fonction des saisons de suivi. Old indique les effectifs calculés sur les rapports d'origine, new indique les effectifs recalculés en 2020 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	effectif old	effectif new	$Q_{j\ max} m^3.s^{-1}$
2012-2013	130 000	130 647	750
2013-2014	119 616	151 930	1 000
2014-2015 *	69 509	118 157	400
2015-2016	114 186	141 980	320
2016-2017	81 366	106 162	200
2017-2018	68 160	50 288	200
2018-2019	64 578	61 527	200
2019-2020	-	99 086	1 000

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, 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.

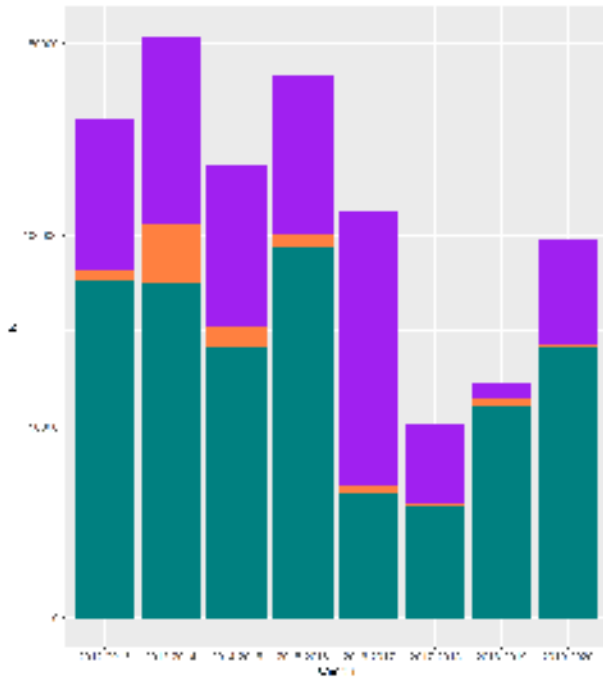


FIGURE 39 – Effectifs annuels estimés sur l'ensemble du barrage, en turquoise (N) $\odot$ $\blacksquare$ =effectifs mesurés, en orange $N\otimes$ $\blacksquare$ =effectifs extrapolés à partir de données de densité recueillies dans la journée et extrapolés en fonction du ratio des débits lors des observations et sans. En mauve, $N\oplus$ $\blacksquare$ effectifs extrapolés à d'un modèle saisonnier.

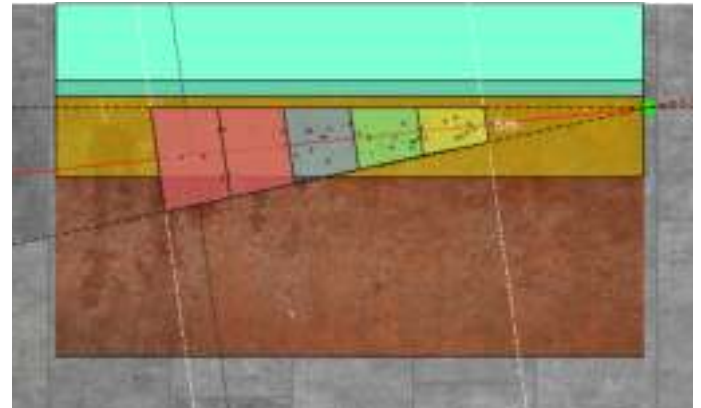


FIGURE 40 – $\Phi=s$, $\beta=-7$, $h=1$, $O_t=320$, $O_{t\circ}=210$, $N'_{40+}=34$, $N'_{40-}=32$, date= 18 oct. au 01 nov.

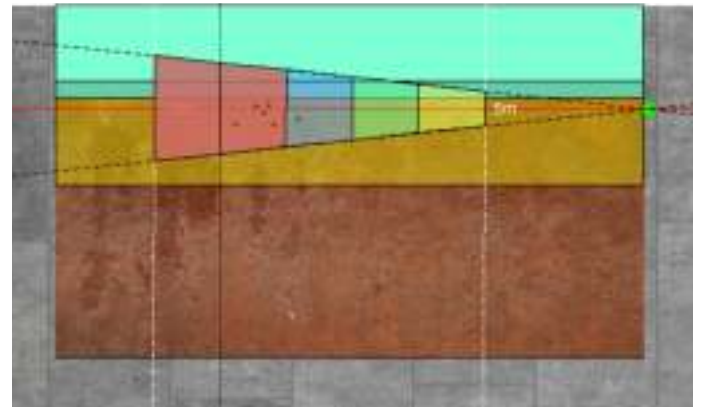


FIGURE 41 – $\Phi=s$, $\beta=0.5$, $h=1$, $O_t=98$, $O_{t\circ}=66$, $N'_{40+}=6$, $N'_{40-}=2$, date= 25 oct. au 28 oct.

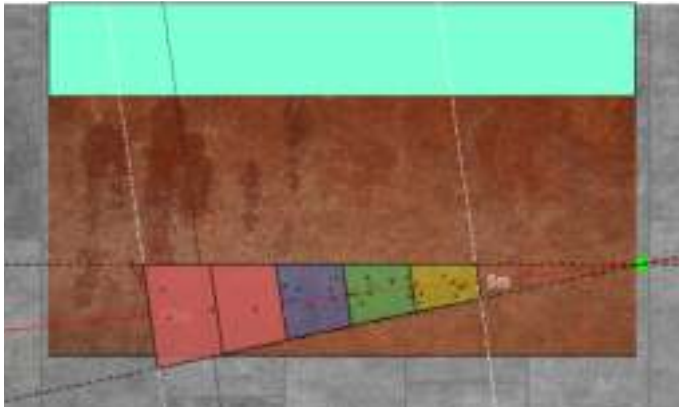


FIGURE 42 – $\Phi=0$, $\beta=-7$, $h=1$, $O_t=14$, $O_{t\circ}=0$, $N'_{4o}+=0$, $N'_{4o}-=0$, date= 30 oct. au 31 oct.

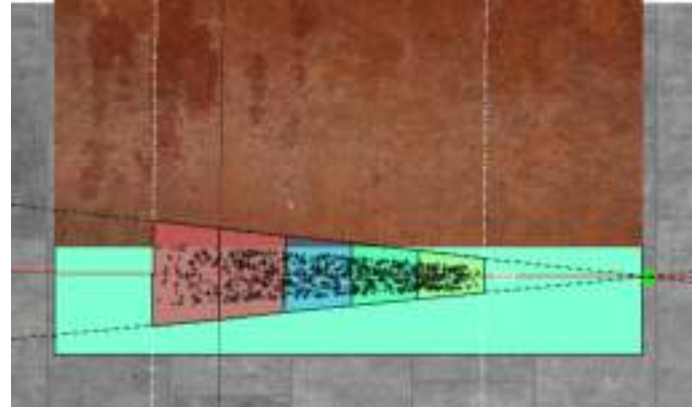


FIGURE 45 – $\Phi=f$, $\beta=0.5$, $h=-5$, $O_t=1793$, $O_{t\circ}=1563$, $N'_{4o}+=843$, $N'_{4o}-=3$, date= 04 nov. au 19 févr.

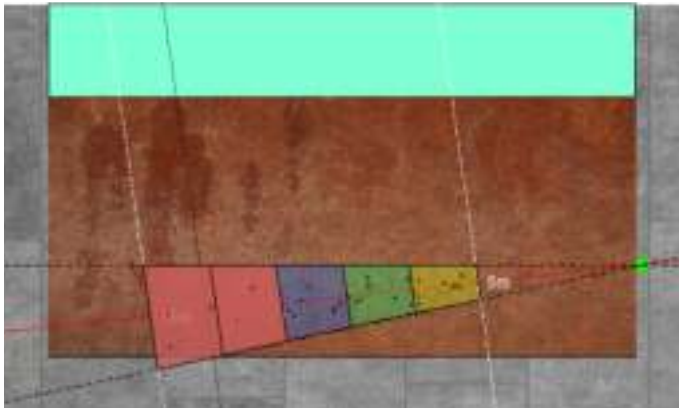


FIGURE 43 – $\Phi=0$, $\beta=-7$, $h=-4.5$, $O_t=46$, $O_{t\circ}=7$, $N'_{4o}+=29$, $N'_{4o}-=16$, date= 01 nov. au 04 nov.

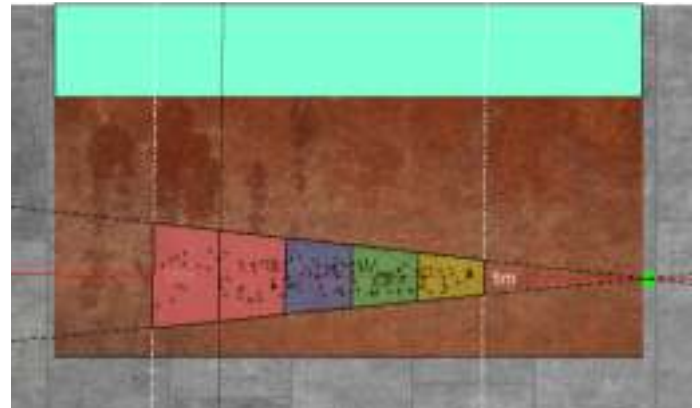


FIGURE 46 – $\Phi=0$, $\beta=0.5$, $h=-5$, $O_t=1011$, $O_{t\circ}=233$, $N'_{4o}+=144$, $N'_{4o}-=7$, date= 04 nov. au 19 févr.

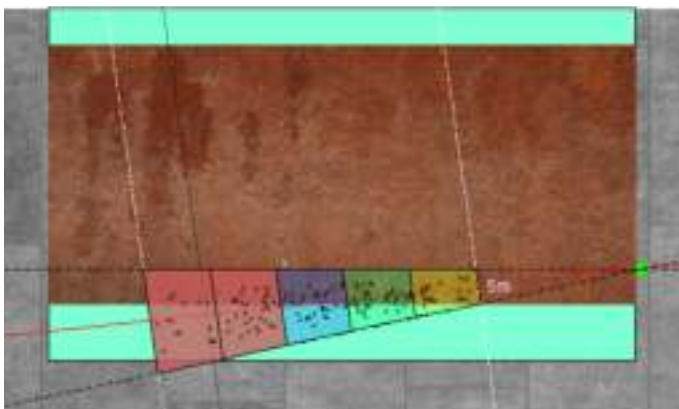


FIGURE 44 – $\Phi=f$, $\beta=-7$, $h=-4.5$, $O_t=51$, $O_{t\circ}=42$, $N'_{4o}+=137$, $N'_{4o}-=4$, date= 01 nov. au 04 nov.

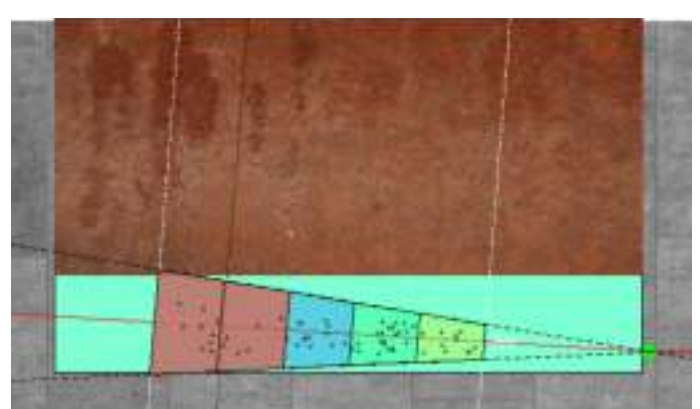


FIGURE 47 – $\Phi=f$, $\beta=4$, $h=-7$, $O_t=26$, $O_{t\circ}=24$, $N'_{4o}+=62$, $N'_{4o}-=0$, date= 05 nov. au 06 nov.

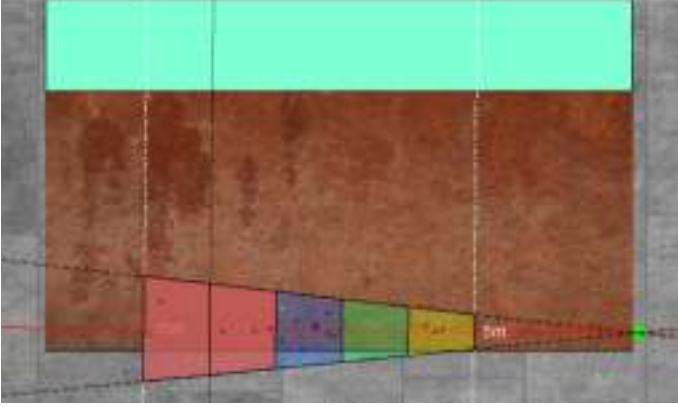


FIGURE 48 - $\Phi=0$, $\beta=0.5$, $h=-7.1$, $O_t=123$, $O_{t\circ}=22$, $N'_{4o}+=17$, $N'_{4o}-=1$, date= 13 nov. au 22 nov.

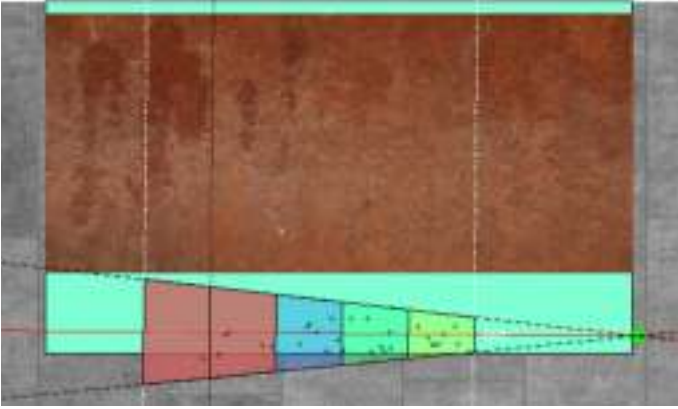


FIGURE 49 - $\Phi=f$, $\beta=0.5$, $h=-7.1$, $O_t=165$, $O_{t\circ}=136$, $N'_{4o}+=29$, $N'_{4o}-=1$, date= 13 nov. au 22 nov.

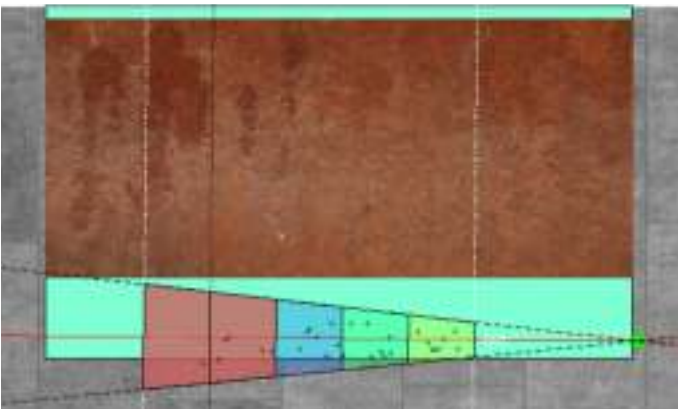


FIGURE 50 - $\Phi=f$, $\beta=0.5$, $h=-7.1$, $O_t=165$, $O_{t\circ}=136$, $N'_{4o}+=29$, $N'_{4o}-=1$, date= 13 nov. au 22 nov.

5 Notations

τ	Tailles d'anguilles, <45cm mâles, 45-60cm petites femelles, 60-80cm grandes femelles, >80cm très grandes femelles
δ	Classes de distance au sonar (2,5m[, (5,7m[, (7,9m[, (9,11m[, (11,13m[et (13,15m[
β	Angle du didson
Φ	Type d'écoulement du barrage , s surface, f =fond
O_t	Période d'enregistrement de 30 mn
$O_{t\circ}$	Période d'enregistrement de 30 mn avec visualisation
h	Altitude du didson en IGN69
$N'_{4o}(t, \tau, \delta, k)$	Dévalaison observée dans le champ de détection du didson sur la vanne 4
$N_{4o}(t, \tau, \delta, k)$	Dévalaison réelle dans le champ de détection du didson sur la vanne 4, c'est à dire corrigée des problèmes d'efficacité de détection
$N_4(t, \tau)$	Dévalaison sur l'ensemble de la vanne 4
$N(t, \tau)$	Dévalaison au pas de temps t pour la classe de taille τ

$Q_4(t)$	Débit total de la vanne 4 au temps t
$Q(t)$	Débit total de la Vilaine au temps t
$S(k, \delta)$	Surface couverte par le faisceau à la distance δ pour la position k
$S(k)$	Surface couverte par le faisceau pour la position k
$D(t)$	Profondeur de la colonne d'eau en amont
$C(t)$	Charge d'eau sur le volet en surface
$F(t, k, \Lambda, \lambda)$	Fonction de répartition verticale des anguilles
l	Largeur de la vanne
$E(\widehat{\delta, \tau, k})$	Efficacité du didson calculée par un glm
$\bar{E}_k$	Efficacité moyenne du didson pour chaque position k
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.

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	952	2 479	8 270
	$f3\odot$	630	1 429	17 046	56 857
	$f5\odot$	950	2 150	19 557	63 553
	$\sum \odot$	2 048	4 531	39 082	128 681
	$\otimes(?)$				3 237
	$\oplus(?)$				39 602
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				130 647
2013-2014	$s\odot$	870	2 182	6 371	27 752
	$f3\odot$	207	727	5 646	23 321
	$f5\odot$	353	1 240	7 307	30 753
	$sl\odot$	324	838	4 798	24 917
	$\sum \odot$	1 754	4 987	24 121	106 743
	$\otimes(?)$				15 597
	$\oplus(?)$				48 961
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				151 930
2014-2015	$s\odot$	526	1 287	5 846	14 031
	$f3\odot$	460	1 573	9 568	14 710
	$f5\odot$	772	2 552	13 697	53 385
	$\sum \odot$	1 758	5 412	29 110	82 126
	$\otimes(?)$				5 376
	$\oplus(?)$				41 922
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				118 157
2015-2016	$s\odot$	1 426	3 092	8 508	20 905
	$f5\odot$	2 133	6 299	33 403	125 260
	$\sum \odot$	3 559	9 391	41 910	146 165
	$\otimes(?)$				3 288
	$\oplus(?)$				41 607
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				141 980

TABLEAU 11 – (...suite ...)

Saison	type	N'_{o4}	N_{o4}	N_4	N
2016-2017	$s\odot$	1 003	2 062	7 444	21 851
	$f5\odot$	782	2 100	11 384	39 745
	$\sum \odot$	1 785	4 162	18 827	61 596
	$\otimes(?)$				1 578
	$\oplus(?)$				71 866
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				106 162
2017-2018	$s\odot$	189	398	1 168	4 424
	$f5\odot$	1 096	3 027	16 643	52 714
	$\sum \odot$	1 285	3 424	17 811	57 138
	$\otimes(?)$				459
	$\oplus(?)$				20 428
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				50 288
2018-2019	$s\odot$	779	1 598	4 000	17 269
	$f5\odot$	896	2 395	12 940	50 019
	$\sum \odot$	1 675	3 993	16 940	67 288
	$\otimes(?)$				1 986
	$\oplus(?)$				4 057
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				61 527
2019-2020	$s\odot$	73	189	426	2 203
	$f5\odot$	1 043	3 370	17 926	78 965
	$\sum \odot$	1 116	3 559	18 352	81 168
	$\otimes(?)$				420
	$\oplus(?)$				27 806
	$\sum \odot \otimes \oplus(?)$				99 086

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

Saison	mois	$N_{\odot}$	$N_{\otimes}$	$N_{\oplus}$
2012-2013	sept	1810	373	0
	oct	23471	1568	5700
	nov	21225	1000	9859
	déc	8903	0	12929
	janv	5244	8	1681
	févr	5462	0	331
	mars	7661	269	1123
	avr	14034	18	7979
2013-2014	oct	444	425	0
	nov	11370	3969	47417
	déc	47757	8800	0
	janv	11182	1944	0
	févr	10242	0	0
	mars	4041	22	1458
	avr	2336	438	86
2014-2015	oct	1113	54	268
	nov	36198	10	12979
	déc	323	269	21185
	janv	12651	33	2399
	févr	5081	183	2749
	mars	5458	1033	2343
	avr	10035	3794	0
2015-2016	sept	0	0	14
	oct	5	0	271
	nov	1831	223	665
	déc	8793	364	4862
	janv	44042	1053	24386
	févr	17830	19	388
	mars	10571	149	1960
	avr	14012	1480	9060
2016-2017	oct	0	0	139
	nov	2481	8	1298
	déc	604	29	163
	janv	199	0	486
	févr	15247	220	19286
	mars	12377	1224	49245
	avr	1810	97	1249
2017-2018	nov	0	0	38
	déc	3122	175	14191
	janv	23257	284	4429
	févr	426	1	890
	mars	2596	0	880
2018-2019	nov	238	0	47
	déc	12630	85	119
	janv	2149	38	0
	févr	29076	10	3308
	mars	6966	939	0
	avr	4425	915	584

... suite page suivante...

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

Saison	mois	$N_{\odot}$	$N_{\otimes}$	$N_{\oplus}$
2019-2020	oct	2404	253	231
	nov	34175	159	0
	déc	17198	0	3121
	janv	8798	8	1391
	févr	8286	0	4568
	mars	0	0	12733
	avr	0	0	5763

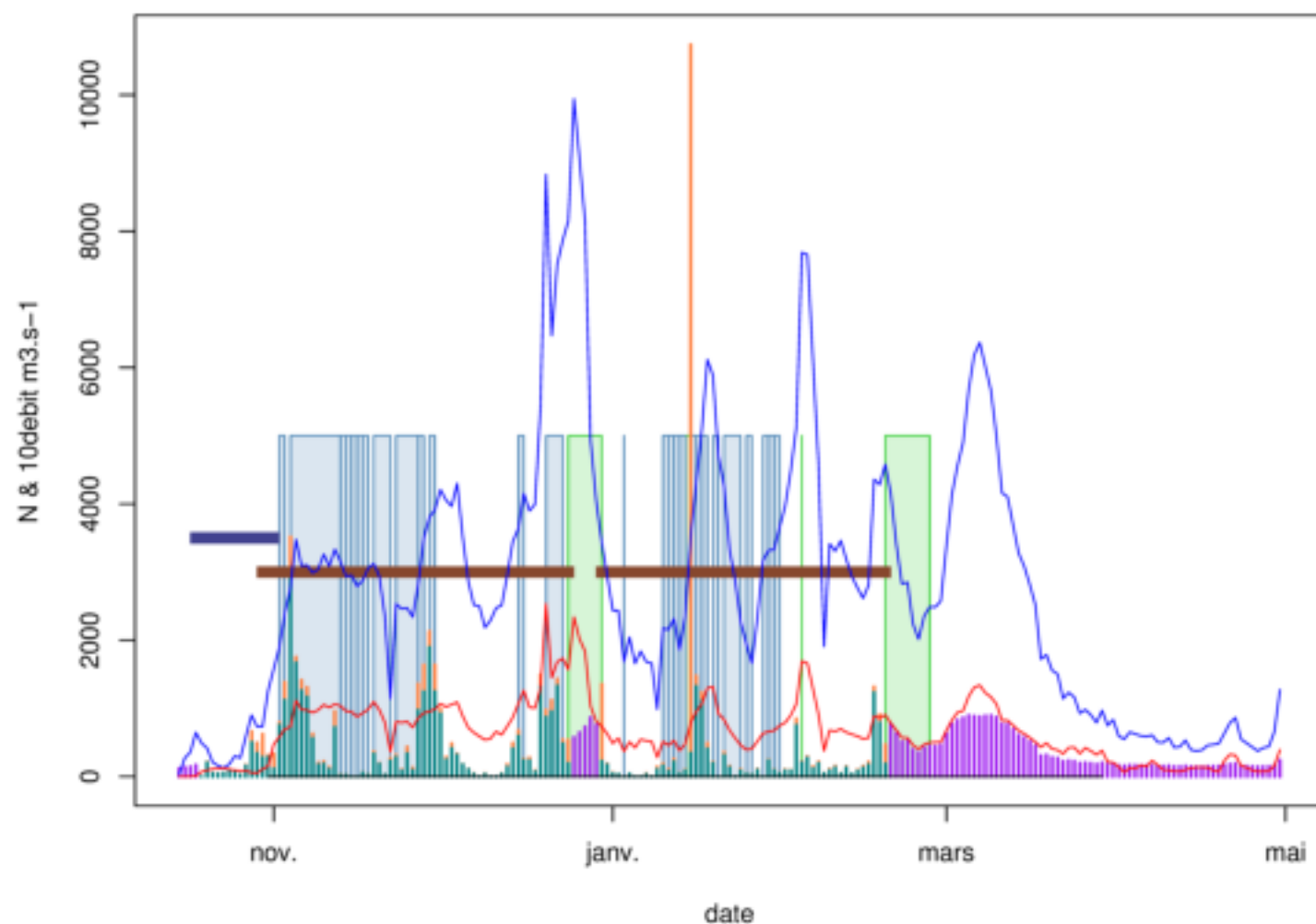
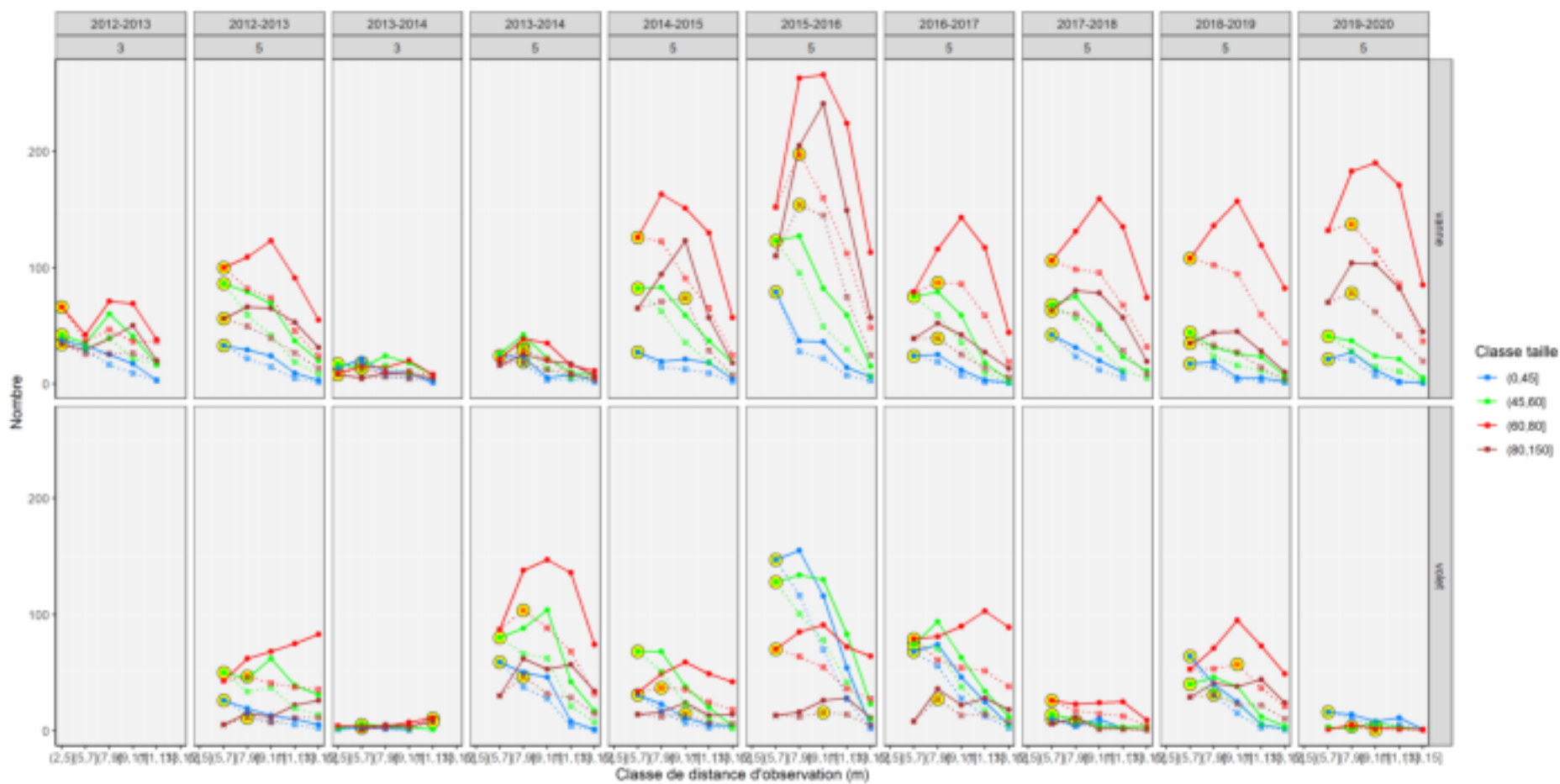


FIGURE 51 – Effectifs journaliers estimés sur l'ensemble du barrage, en bleu (N) ⊗ = effectifs mesurés, en orange N ⊗ = effectifs extrapolés à partir de données de densité recueillies dans la journée. En mauve, N ⊕ = effectifs extrapolés à partir des données des jours voisins. En bleu —, débits journaliers 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 bleu et marron indiquent la position verticale du didson.



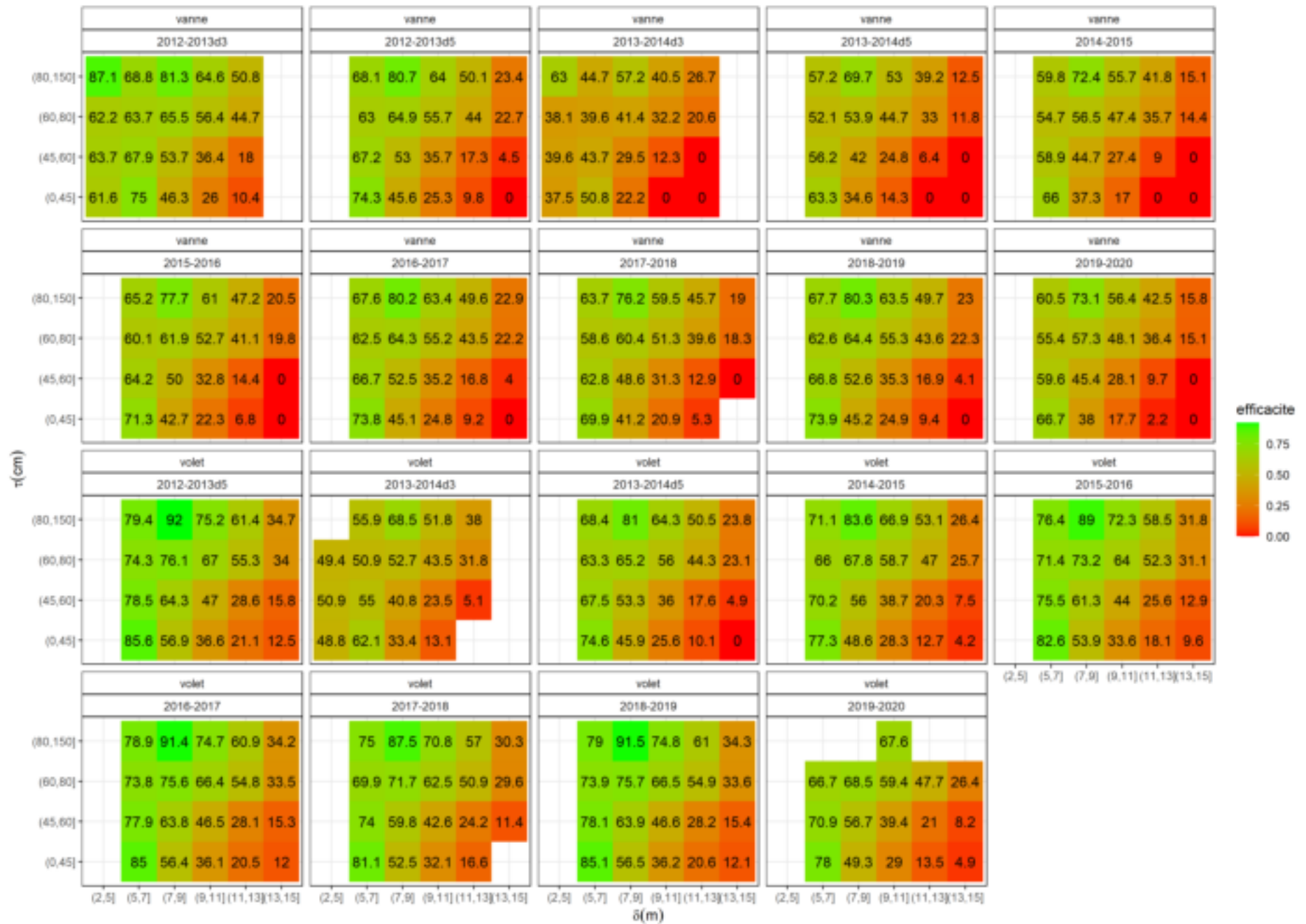


FIGURE 53 – Efficacité en fonction de la taille des anguilles et de la distance au didson, commune aux deux positions du sonar, fond et surface.

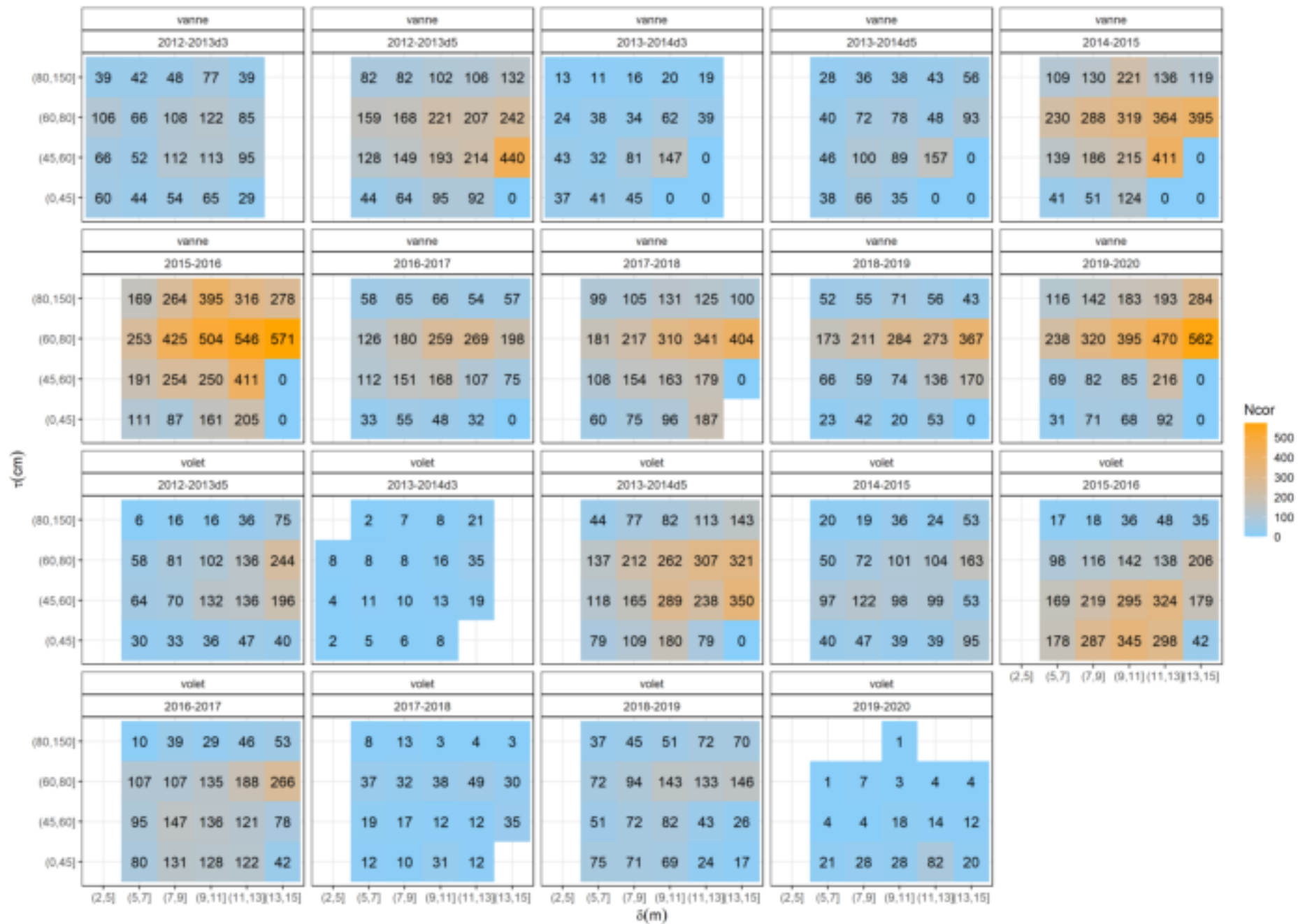


FIGURE 54 – Effectif recalculés après correction. En théorie les effectifs devraient augmenter. Il n'est pas toujours possible d'extrapoler les effectifs pour la classe de distance la plus grande, car il n'y a alors plus de détections.

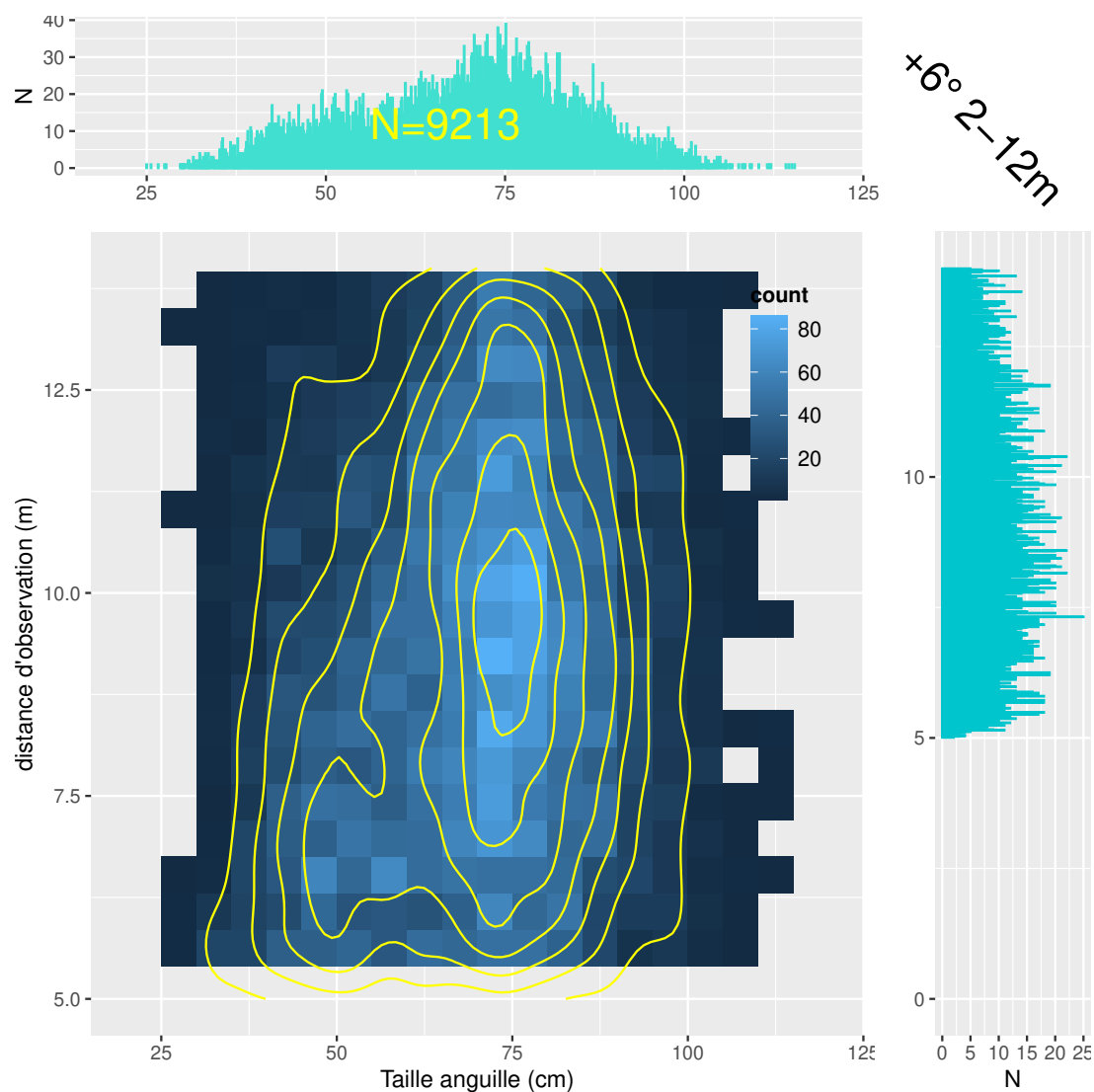


FIGURE 55 – Taille des anguilles en fonction de la distance au sonar en vannes. Couleur en fonction du nombre d'observations par carré. Les polygones d'isodensité permettent de mettre en évidence la relation distance - taille (les plus petites anguilles ne sont visibles que près du didson). Les données correspondent à toutes les anguilles enregistrées depuis 2012 pour une position du didson au fond.

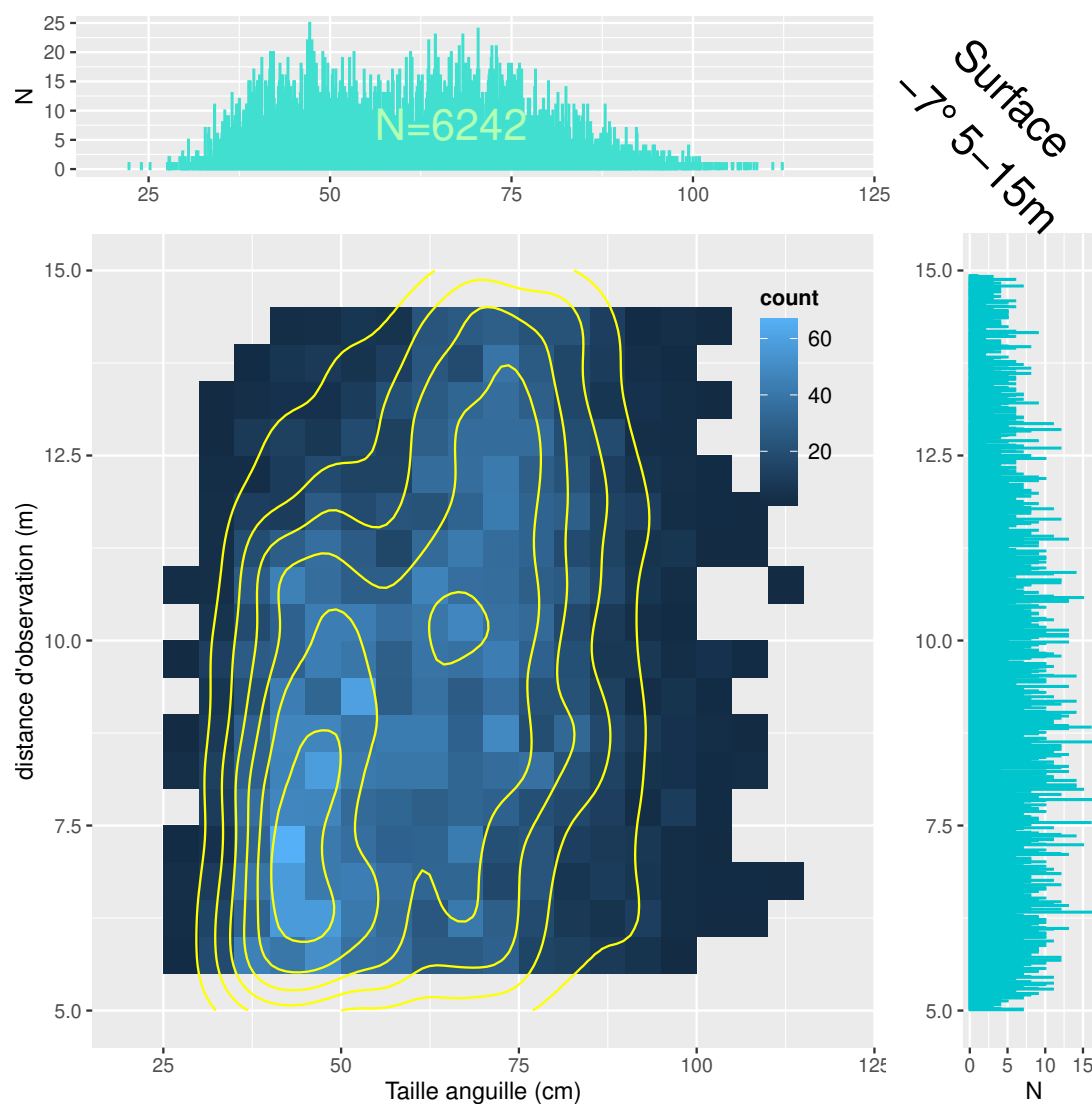


FIGURE 56 – Taille des anguilles en fonction de la distance au sonar en volets. Couleur en fonction du nombre d'observations par carré. Les polygones d'isodensité permettent de mettre en évidence la relation distance - taille (les plus petites anguilles ne sont visibles que près du didson). Les données correspondent à toutes les anguilles enregistrées depuis 2012 pour une position du didson en surface.

TABLEAU 13 – 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., 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, IRS-TEA, 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. gpcplib : 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.

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 et Adolphe Charles pour leur aide au quotidien. Cette étude a été financée par l'Agence de l'eau Loire Bretagne.

Rapport L^AT_EX

Dernière compilation le 3 janvier 2022
version R 4.1.2