

Projet FUSION

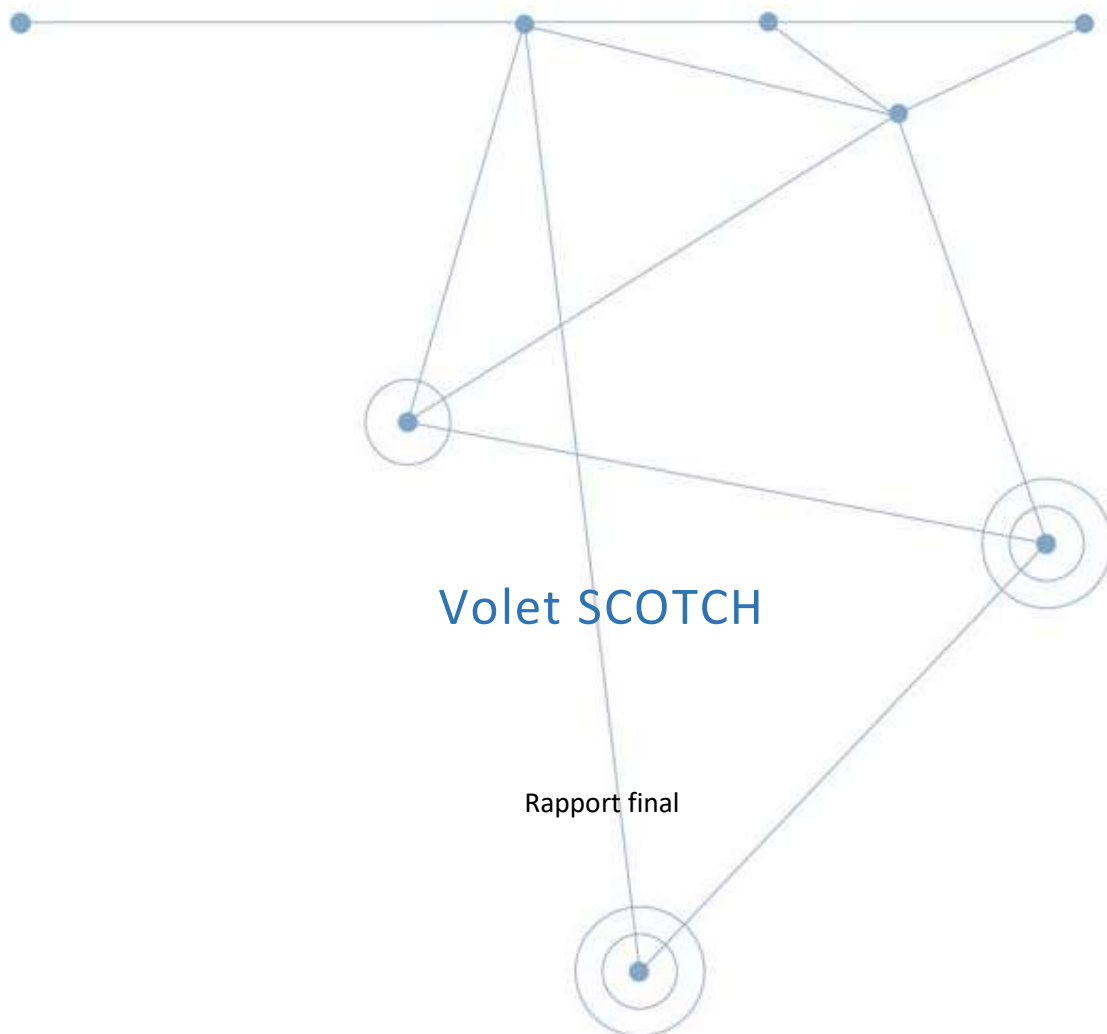


Table des matières

1	Contexte	3
2	Observation de comportements sur vidéos	4
3	Modélisation du comportement de poissons en interaction avec un engin de pêche	13
4	Simulation de structure et interaction mécanique entre filet et poisson.....	17
5	Enquêtes auprès des professionnels.....	24
6	Annexe 1 : présentation « étude du comportement d'échappement des poissons face aux engins de pêche »	30
7	Annexe 2 : enquêtes auprès des professionnels.....	32
8	Annexe 3 : publication des travaux sur les propriétés des filets et leur simulation	34

1 Contexte

La réglementation « zéro rejet » de la nouvelle PCP vise à éliminer progressivement les rejets de pêche en mer. Pour y parvenir, des mesures techniques de sélectivité, option abordée par ce projet, doivent permettre de réduire la capture des individus non valorisés.

On cherche dans la partie initialement nommée SCOTCH du projet FUSION à accompagner ces évolutions techniques par une prise en compte des comportements des individus en lien avec le fonctionnement de l'engin de pêche.

Les travaux effectués dans le cadre du projet FUSION concernent les chaluts mais pourraient être transposés à tout engin constitué de filet.

2 Observation de comportements sur vidéos

Cette partie est issue du rapport de stage de Master 1 rédigé par Aurore Cortay. Des résultats complémentaires sont présentés dans l'annexe 1. Une publication scientifique largement inspirée de ces travaux a été soumise à l'ICES journal of Marine science en Février 2020. Une fois accepté le manuscrit sera transmis aux partenaires du projet et aux financeurs.

2.1 Objectifs

L'objectif de cette étude éthologique, qui fait partie de la recherche appliquée, est de caractériser le comportement de ces poissons dans l'environnement du chalut, avec comme principale cible les comportements d'échappement et précédant l'échappement, puisque ce sont les comportements favorisés par les dispositifs de sélectivité.

L'étude porte sur la rallonge, cad la zone située à quelques mètres en amont du cul du chalut (voir figure 1). Cette zone étroite est en effet l'un des lieux où on observe le plus grand nombre d'échappements. En effet, les poissons vont avoir naturellement tendance à éviter le chalut, et donc éviter de traverser les mailles s'ils ont la possibilité de passer par une sortie plus grande comme, par exemple, la bouche du chalut, ou encore de se maintenir à distance de ces mailles (Glass et al 1993). Or, en arrivant vers la fin du chalut, les poissons vont être plus stressés et auront donc plus tendance à fuir en raison de leur proximité vis-à-vis des parois du chalut, ce qui rend la zone bien plus intéressante pour l'étude de ce comportement. Cette étude sera faite de jour, ce qui aura l'avantage de permettre aux poissons d'avoir de la visibilité, la vision étant un sens très important pour ces animaux (Walsh & Hickey 1993) et d'avoir un niveau d'activité constant lors du trait, les poissons ayant des niveaux d'activité variés en fonction du moment de la journée (Nambiar et al 1970).

Dans un premier temps, il s'agira de décrire les tentatives aux moyens de statistiques descriptives, lesquelles nous permettront d'obtenir le pourcentage de tentative, le taux de réussite ainsi que le nombre d'échappement moyen. Puis, des statistiques exploratoires seront utilisées pour compléter les résultats, notamment concernant les facteurs influençant les échappements, mais aussi concernant la manifestation de ces comportement (lieu d'échappement, influence du nombre de tentatives sur la réussite). On cherchera par exemple à savoir s'il existe un lien entre le nombre de tentatives et la réussite, ce que l'on peut supposer être le cas, les poissons apprenant de leurs échecs et ayant plus de chance de réussir s'ils essaient plusieurs fois. Les poissons étant plus enclins à des tentatives d'échappement lorsqu'ils sont stressés (Krag et al 2009), et le niveau de stress pouvant être caractérisé par un niveau d'activité se situant entre les mouvements optomoteurs (maintient en position) et les mouvements erratiques (mouvements irréguliers et imprédictibles) (Kim & Wardle, 2003), on pourra aussi s'interroger sur le lien qui existe entre les changements de position ou d'orientation des poissons et le nombre de tentatives qu'ils font. On s'attend ainsi à ce que les poissons montrant beaucoup de variations dans ces paramètres soient ceux qui tentent le plus de s'échapper, auquel cas on observera de fortes corrélations. Le stress pouvant être fortement lié aux contacts, avec un congénère, le chalut ou tout autre objet (Krag et al., 2014), on pourra aussi se demander si la présence d'un ou plusieurs contacts entre le poisson en question et tout autre élément est corrélé au nombre de tentatives. On s'attendra ici à ce que les poissons ayant eu un ou plusieurs contacts soient ceux qui tentent le plus de s'enfuir. Enfin, les poissons ne

s'échappant pas obligatoirement dans la même zone du chalut, on se peut se demander s'il existe une position privilégiée par ces poissons pour s'échapper.

2.2 Méthodes

2.2.1 Récolte des données

Les vidéos analysées ont été relevées le 13 septembre 2014, à bord du navire Le jusant dans un chalut à mailles losanges disposant d'une fenêtre à mailles carrées, c'est-à-dire d'une section avec des mailles, de forme différente, mais aussi plus larges, permettant l'échappement (voir fig.1). Elles ont été réalisées entre les latitudes 49°13'49N et 49°24'47N et entre les longitudes 07°00'99 O et 06°56'81 O et ce à une profondeur de 123m. La vitesse du chalutier a été fixée à 3 noeuds (environ 5,5km/h).

Ces observations ont été réalisées à partir d'un engin de type VECOC (Vidéo Embarquée de Contrôle et d'Observation de Chalut), un système fixe et autonome enregistrant un signal vidéo sur un disque dur ainsi que des mesures de profondeurs et de températures sur une mémoire interne. Cet outil est placé dans le chalut, à quelques mètres du cul du chalut (voir figure 1).

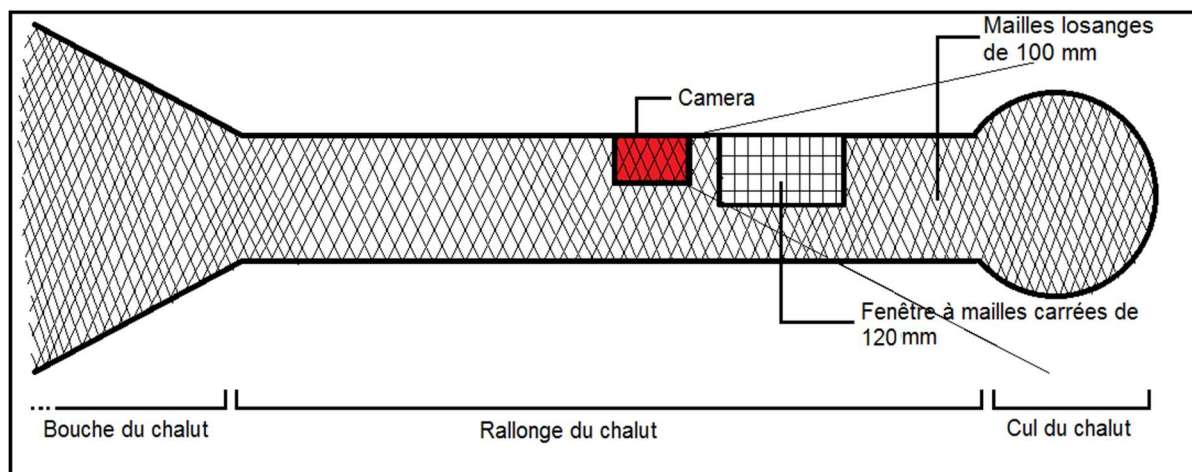


Figure 1: Représentation du chalut équipé du dispositif vidéo

2.2.2 Analyse vidéo

2.2.2.1 Méthode générale

Cette étude se consacre principalement aux gadidés, et plus précisément aux aiglefin (Melanogrammus aeglefinus), des poissons démersaux vivant en Atlantique nord, à des profondeurs variant entre 10 et 450 mètres. Ainsi, sur les 451 poissons suivis individuellement pendant deux semaines d'analyse, on ne s'intéressera qu'aux 148 aiglefin recensés.

Cette analyse a été réalisée sur environ 10 minutes de vidéo, prises en deux fois cinq minutes séparées de 50 minutes dans une vidéo de trois heures. Une étude préalable (non montrée ici) a indiqué qu'il n'y avait aucune différence de temps passé devant la caméra ou de comportements entre ces deux séquences. L'analyse vidéo a été effectuée sous Boris où un protocole répondant à l'ensemble des questions a été réalisé. L'ensemble des données a été ensuite analysée sous R,

avec des statistiques descriptives (moyennes, pourcentages...) mais aussi des statistiques exploratoires de type comparaison de moyennes de deux groupes indépendants (test U de Mann Withney et test de permutation de Fisher Pitman), ou encore test du Khi-deux de conformité et test binomiaux, le tout corrigé par une correction de Holm si nécessaire.

Parmi tous les paramètres observés, seuls ceux intéressants pour cette étude sont conservés. Il y en a trois au total avec leurs sous-catégories. Dans un premier temps, on prend en compte la position du poisson. Cette position est décrite verticalement et horizontalement, ce qui induit au total neuf localisations différentes (haut/droite, haut/centre etc.) (voir figure 2). Ensuite, on note lorsque le poisson fait une tentative d'échappement. Ici, une tentative d'échappement, pour éviter toute ambiguïté sur l'intention, est décrite comme le contact entre l'extrémité avant du poisson, lequel nage en direction des mailles du filet. Ses deux modalités sont l'échec ou la réussite du poisson. Enfin, les stimulus sont pris en compte. Dans cette étude, il s'agit du contact entre le poisson et un congénère ou encore entre le poisson et le chalut. Contrairement à la tentative d'échappement, le contact se fait ici sur n'importe quelle partie du corps du poisson (hormis l'extrémité avant) ou lorsque le contact se fait sans que le poisson ne nage vers les mailles.

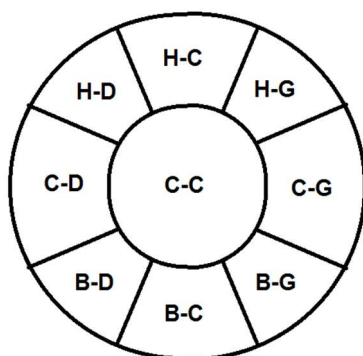


Figure 2 : Section transversale du chalut décrivant les neuf positions pouvant être occupées par les poissons. Le sens droite-gauche est défini selon le sens de déplacement du chalut. C = Centre, D = Droite, G= Gauche, H = Haut et B = Bas.

Description du comportement d'échappement

Cette partie de l'étude s'attarde sur la description du comportement d'échappement en lui-même. L'unité statistique employée ici est l'individu, pour lequel on a relevé le nombre de tentatives, et s'il en a réussi. Ce test a été réalisé sur l'ensemble des aiglefins (148 poissons). On calculera le pourcentage de tentative, ainsi que le taux de réussite et le nombre moyen de tentatives.

Lien entre le nombre de tentatives et la réussite

Pour répondre à cette question, deux groupes seront formés parmi les 148 poissons, l'unité statistique étant l'individu. Le premier groupe contiendra les poissons n'ayant pas réussi à fuir et le second, les poissons ayant réussi. L'objectif est ensuite de calculer ce lien entre le nombre de tentatives et la réussite via un test de comparaison de moyennes entre les deux groupes formés. Les données ne suivant pas une loi de normalité et les variances étant inégales, on préférera un test non paramétrique en rangs tels que celui de Mann Withney.

Lien entre le déplacement des poissons et les tentatives

Le but ici est de savoir si le niveau d'activité est lié aux tentatives. Un comportement de stress étant caractérisé par un déplacement plus imprévisible et aléatoire, on s'attardera sur le nombre de changements de position ou d'orientation, depuis leur arrivée dans le champ de la caméra et jusqu'à leur disparition, et leurs corrélations avec le nombre de tentatives.

Ici, l'unité statistique sera l'individu et un test de corrélation de Spearman sera effectué en raison

de la distribution ne suivant pas une loi de normalité. Cette corrélation sera réalisée entre le nombre de changements de tous les poissons (148 poissons) et le nombre total de tentatives.

Lien entre le contact et les tentatives

Ici, le but est de savoir si les contacts, avec le chalut ou un congénère, augmentent le nombre d'échappement. Ici, l'unité statistique sera l'individu et pour chacun on notera le nombre de contacts et le nombre de tentatives d'échappement. Suite à cela, deux groupes seront formés : ceux ayant eu un ou plusieurs contacts et ceux n'ayant eu aucun contact.

Sur les 148 aiglefin, 71 font partie de ceux ayant eu un ou plusieurs contacts et 77 font partie du second groupe. Puisque la distribution ne suit pas une loi normale, mais que les variances sont similaires, un test de permutation de Fisher Pitman sera réalisé.

Emplacement préférentiel pour l'échappement

L'objectif ici est de savoir si les poissons s'échappent aléatoirement dans le chalut ou s'ils ont un emplacement préférentiel. En effet, tous les poissons ne s'échappant pas au même endroit, il est fortement utile de savoir s'il existe une probabilité d'échappement plus forte, dans une zone, pour l'espèce ciblée. Ici, seulement les poissons tentant de s'échapper seront conservés. L'unité statistique sera la tentative, ce qui représente un effectif de 149. Dans un premier temps, et puisqu'il s'agit d'effectifs, un test du khi-deux de conformité sera effectué afin de savoir si les échappements se font aléatoirement ou non entre les neuf localisations, puis une loi binomiale exacte sera appliquée afin de savoir quel emplacement est favorisé par rapport aux autres, horizontalement et verticalement.

2.3 Résultats

Description du comportement d'échappement

Sur les 148 aiglefin analysés, 93 d'entre eux ont tenté de s'échapper au moins une fois, ce qui représente 62.8 % de l'échantillon observé. Sur ce nombre de poissons, 19 ont réussi, ce qui représente 20.4 % de réussite aux tentatives. En moyenne, les poissons ayant tenté de s'échapper ont essayé entre une et cinq fois, ce qui représente en moyenne 1.60 (+/- 0.99) fois.

Lien entre le nombre de tentatives et la réussite

En général, lorsque les poissons tentent de fuir, ils réussissent à la première tentative. En effet, ceux réussissant tentent en moyenne 1.0 (+/- 0.0) fois, tandis que ceux ne réussissant pas tentent en moyenne 1.68 (+/- 1.04) fois (test de Mann Withney : $W = 1007$, $p < 0.01$, fig 3).

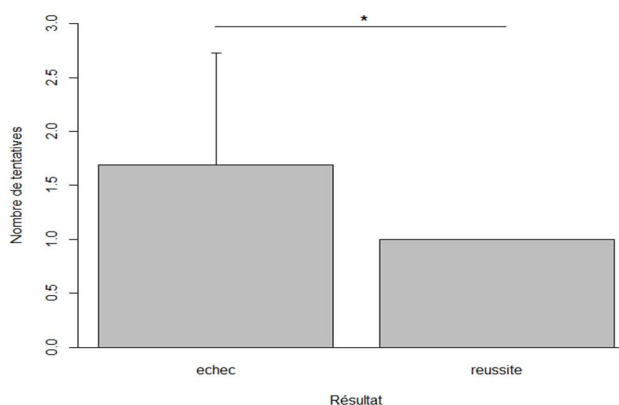


Figure 3 : Nombre de tentatives (moyenne + écart type) entre les poissons ne réussissant pas à s'échapper et les poissons y parvenant.

Lien entre le déplacement des poissons et les tentatives

D'après l'analyse statistique effectuée, les poissons qui changent le plus d'orientation sont ceux qui tentent le plus de s'échapper (test de corrélation de Spearman, $\rho = 0.64$, $p < 0.05$, fig 4.).

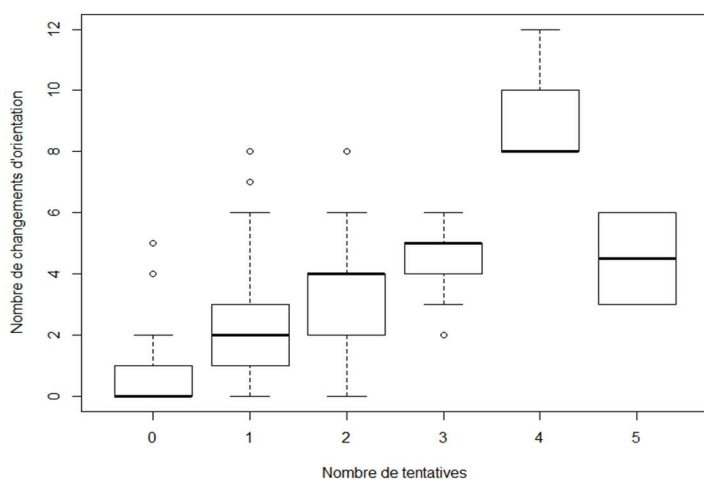


Figure 4 : Corrélation entre le nombre de changements d'orientation et le nombre de tentatives d'échappement. Les boîtes à moustaches permettent d'observer la variabilité des données, le trait épais représentant la médiane, les traits fins les quantiles (25 % et 75 %) et les points les valeurs extrêmes.

Pour autant, la corrélation entre le nombre de tentatives et le nombre de changements de position est plus faible (test de corrélation de Spearman, $\rho = 0.40$, $p < 0.05$, fig 5).

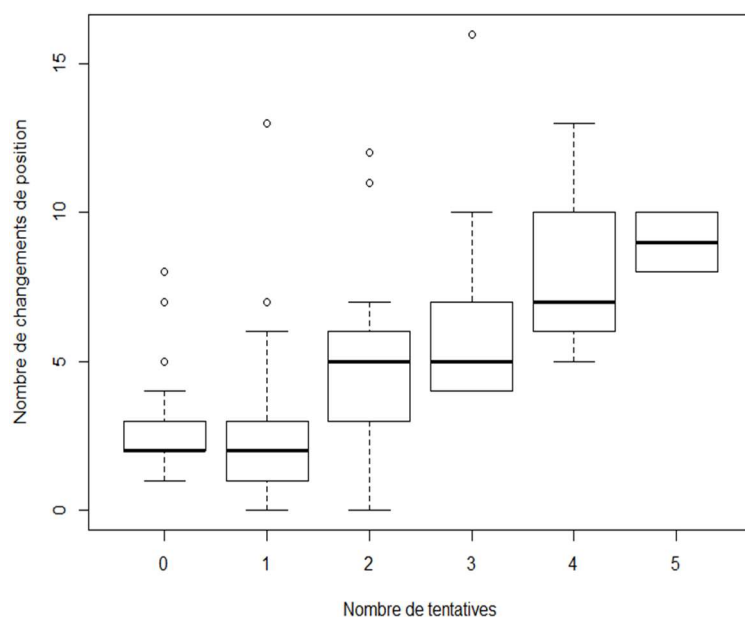


Figure 5 : Corrélation entre le nombre de changements de position et le nombre de tentatives. Les boîtes à moustaches permettent d'observer la variabilité des données, le trait épais représentant la médiane, les traits fins les quantiles (25 % et 75 %) et les points les valeurs extrêmes.

Lien entre le contact et les tentatives.

D'après l'analyse statistique effectuée, les poissons ayant été en contact avec le chalut ou un congénère tentent en moyenne 1.2 (+/- 1.25) fois de s'échapper tandis que ceux n'ayant eu aucun contact tentent en moyenne 0.8 (+/- 0.8) fois. Les poissons ayant donc eu un ou plusieurs contacts sont donc ceux qui tentent le plus de s'échapper (test de permutation de Fisher-Pitman, $Z = -2.46$, $p = 0.01$, fig 6.).

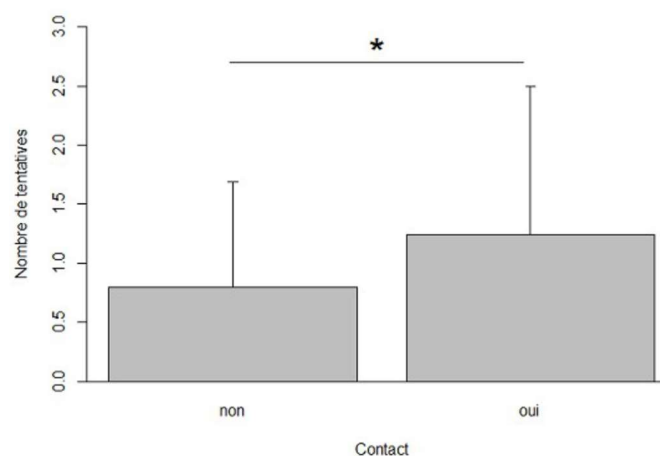


Figure 6 : Nombre de tentatives (moyenne + écart type) entre des poissons ayant été en contact avec le chalut ou un congénère et ceux n'ayant eu aucun contact.

Emplacement préférentiel pour l'échappement

D'après l'analyse statistique effectuée, les échappements ne se font pas selon un modèle aléatoire, il y a des emplacements privilégiés par lesquels les aiglefin s'échappent (test du Khi-deux, méthode approchée, $\chi^2 = 82,161$, ddl = 8, $p < 0.001$). La principale différence réside au niveau de la position verticale. En effet, il n'y a pas de différence significative entre les différentes positions horizontales de la position basse (test du Khi-deux, méthode approchée, $\chi^2 = 1.8571$, ddl = 0, $p = 0.5$, fig 7.), il y en a pour la position centrale (test du Khi-deux, méthode approchée, $\chi^2 = 11.538$, ddl = 0, $p = 0.002$, fig 7) et il n'y en a pas pour les positions hautes (test du Khi-deux, méthode approchée, $\chi^2 = 0.75$, ddl = 0, $p = 0.72$, fig 7). Par ailleurs, on n'observe pas de différence significative entre les différentes modalités de la position basse et la position centre-centre (test du Khi-deux, méthode approchée, $\chi^2 = 2.5294$, ddl = 0, $p = 0.51$, fig 7).

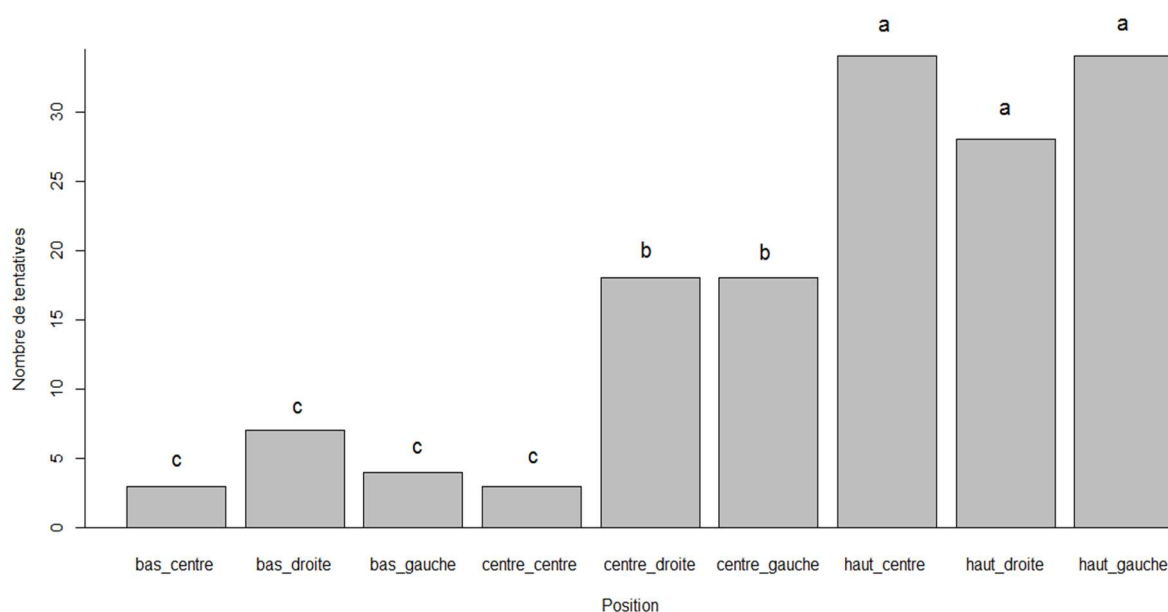


Figure 7 : Effectif des échappements aux différentes positions dans le chalut. Les lettres représentent les différences significatives entre les groupes (il n'y a pas de différences significatives entre les modalités possédant la même lettre).

Par contre, il y a des différences entre les différentes positions verticales. On constate que les poissons s'échappent principalement par les mailles situées en haut du chalut, bien moins par celles du centre et très peu par celles du bas. En effet, il y a bien une différence significative entre le bas et le centre (test binomial exact avec correction de Holm, $p' < 0.001$, fig 8.), de même qu'entre le haut et le centre (test binomial exact avec correction de Holm, $p' < 0.001$, fig 8) et qu'entre le haut et le bas (test binomial exact avec correction de Holm, $p' < 0.001$, fig 8).

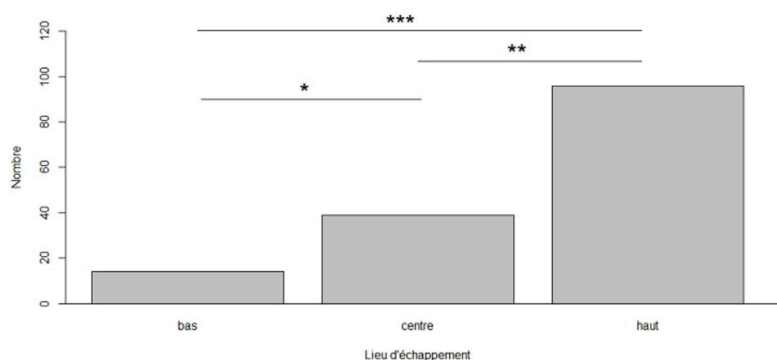


Figure 8 : Effectif des échappements aux différentes positions verticales du chalut. La significativité des résultats est évaluée par rapport à un modèle aléatoire.

2.4 Discussion

L'étude ainsi réalisée comporte plusieurs niveaux de résultats. Ces derniers suggèrent que les aiglefin vont être nombreux à tenter de s'échapper dans cette zone proche du cul du chalut (plus de 60 % des poissons observés). Pour autant peu vont réussir (la probabilité de succès quand on tente étant de 20 %), ce qui peut notamment être expliqué par la taille des individus. En effet, si les poissons sont trop grands, ils ne peuvent mécaniquement plus passer entre les mailles. Ces poissons, s'ils réussissent à s'échapper, vont y parvenir à la première tentative. Ceci peut s'expliquer par le fait que la caméra se situe vers la fin du chalut, il serait donc intéressant pour la suite du projet de suivre les poissons depuis le début. Ensuite, les poissons décrivant de nombreuses variations dans leur orientation ont été décrits comme ceux tentant le plus de fuir, conformément aux attentes, étant donné qu'un niveau d'activité élevé est témoin de stress et donc, se situant plus proche des déplacements erratiques que des optomoteurs (Kim & Wardle, 2003). Pour autant, on remarque que la corrélation avec le changement de position est bien moindre, ce qui peut s'expliquer par le courant, la vitesse et la direction du chalut, que les poissons ne peuvent contrôler. On peut donc supposer ici que leur position n'est pas uniquement contrôlée par ces derniers, mais aussi par le mouvement du courant d'eau. Par contre, l'orientation est, quant à elle, bien plus contrôlable par les animaux, d'autant qu'un poisson doit forcément s'orienter pour s'échapper, ce qui explique la corrélation bien plus forte. Les poissons qui vont avoir tendance à orienter leur regard dans plusieurs directions sur un temps court vont être ceux qui vont le plus tenter de fuir. Ensuite, le contact va être un élément important dans la fuite des aiglefin, puisque les poissons ayant eu un ou plusieurs contacts vont faire plus de tentatives. Étant facteur de stress (Krag et al 2014), le contact va augmenter le nombre de tentatives de ces derniers, déjà élevé par la proximité avec les mailles, ressentie par les poissons à la fois de façon visuelle, mais aussi via leur ligne latérale. Enfin, il a été montré que les aiglefin tentent de s'échapper surtout par la partie haute du chalut puisque la majorité de ces échappements se font par cette zone (plus de 64 %), ce qui s'explique par le fait que ces derniers nagent principalement dans la partie haute du chalut (Krag et al 2014).

Références

Glass, C.W., Gosden, S.J., Wardle, C.S., 1993. Behavioural studies of the principles underlying mesh penetration by fish. ICES Mar. Sci. Symp. 92–97.

Kim, Y.-H., Wardle, C.S., 2003. Optomotor response and erratic response: quantitative analysis of fish reaction to towed fishing gears. *Fish. Res.* 60, 455–470.

Krag, L.A., Herrmann, B., Karlsen, J.D., 2014. Inferring Fish Escape Behaviour in Trawls Based on Catch Comparison Data: Model Development and Evaluation Based on Data from Skagerrak, Denmark. *PLOS ONE* 9, e88819.

Krag, L.A., Madsen, N., Karlsen, J.D., 2009. A study of fish behaviour in the extension of a demersal trawl using a multi-compartment separator frame and SIT camera system. *Fish. Res.* 98, 62–66.

Nambiar, K.P.P., Hiyama, Y., Kusaka, T., 1970. Behaviour of Fishes in Relation to Moving Nets-III. *Nippon Suisan Gakkaishi* 36, 476–480.

Walsh, S.J., Hickey, W.M., 1993. Behavioural reactions of demersal fish to bottom trawls at various light conditions. *ICES Mar. Sci. Symp.* 68–76.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R

Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL

<https://www.R>

3 Modélisation du comportement de poissons en interaction avec un engin de pêche

3.1 Adaptation des environnements de calcul et graphique

Les principales adaptations concernent (1) la mise en place d'une bibliothèque de l'état du chalut en fonction du remplissage de la poche, cette variable étant supposée la seule qui affecte la forme du chalut dans ce type de problématique. Ce choix permet d'éviter de recalculer à chaque simulation l'évolution de la forme du chalut. (2) La création d'une classe Poisson et d'une classe Population, composée d'individus Poisson. Chaque individu instancié de la classe Poisson possède ainsi ses propres attributs et ses propres comportements. (3) La modification du Viewer 3D, développé lors d'un projet précédent, pour représenter les populations de poissons, pour marquer des individus particuliers et pour représenter leur trajectoire, afin de faciliter la compréhension des comportements globaux, résultats des comportements élémentaires. (4) Enfin un parallélisme d'exécution des process « poissons » et « chalut », impliquant la synchronisation des données des deux ensembles, a été mis en place pour réduire le temps de calcul.

3.2 Modèles de comportement

3.2.1 Choix modèle IBM

Le choix d'une modélisation IBM a été retenu car il utilise l'individu (poisson) comme unité de base de la modélisation, ce qui établit l'équivalence avec l'unité de base observée sur les vidéos et l'unité de base qui interagit avec l'engin dans les tentatives d'échappement. Ces individus sont des entités autonomes possédant leurs caractéristiques et leurs comportements propres. Ils ont donc des « organes » de perception (de l'engin de pêche et des autres individus), de décision et d'action (propulsion).

Les pas d'espace et de temps qui définissent les échelles de vie des individus, et en deçà desquels on peut supposer qu'il n'y a pas de différence significative des résultats de simulation, n'ont pas été optimisés. Quelques études de sensibilité des paramètres des règles comportementales ont été faites.

3.2.2 Modèles de comportement

Les comportements de chaque individu sont tels qu'ils permettent :

- L'évitement des collisions avec l'engin de pêche (le filet) par le maintien d'une distance minimum.
- Une réaction de nage rapide ou moyenne en cas de passage sous le seuil de distance minimum avec l'engin
- La réalisation d'une tentative d'échappement, avec une préférence pour le haut ou le bas de l'engin.

- Le maintien d'une distance minimum avec les individus voisins.
- Le maintien d'une cohésion avec les individus voisins.
- Le maintien d'un alignement avec les individus voisins.
- Le maintien d'un alignement avec l'engin.

Par ailleurs, chaque individu a un stock d'énergie et une résistance à la nage, avec 2 modes de nage (« burst » et « sustainable »), qui puise dans sa réserve d'énergie. Un individu sans énergie est considéré comme mort et rejoint la capture dans le cul du chalut, ce qui en modifie la forme et donc l'ouverture des mailles.

Les observations de vidéos en mer et la littérature ont permis d'établir qualitativement ces comportements mais pas les paramètres qui les régissent. Ces paramètres sont actuellement au nombre 23.

3.2.3 Modèle simplifié

Pour contourner la difficulté à identifier les paramètres des modèles de comportement, un modèle plus simple a été établi. Les nouvelles hypothèses imposent :

- Une durée de vie du poisson une fois arrivé dans la rallonge. Une fois le poisson mort, il rejoint la capture et le cul se déforme selon le volume de capture, les ouvertures des mailles évoluent
- Une périodicité des tentatives d'échappement et un test de réussite d'une tentative
- L'introduction d'un poisson tous les 1/10 de sec ayant une longueur selon une distribution gaussienne. Le poisson a une section circulaire avec un diamètre de 20% de sa longueur
- La vitesse relative à l'eau du poisson en Body Length
- La vitesse de la rallonge sans effet d'entraînement de l'eau
- La durée de simulation : 10000 sec
- L'engin est réduit à la rallonge et au cul

On notera ici qu'on n'utilise plus de règles de comportement (au sens perception-réaction) mais on applique des observations faites dans des conditions similaires. La possibilité de transposer à d'autres engins ou d'autres conditions de pêche est donc probablement faible.

3.3 Résultats

Les premières images (Figure 1, Figure 2) sont des résultats de simulation des comportements selon 3.2.2. Pour ces simulations, les poissons sont positionnés de manière aléatoire devant le chalut entre les panneaux. Ces résultats montrent, logiquement de manière qualitative compte tenu des choix faits pour les paramètres, des comportements observables en mer : les poissons se concentrent du fait de la règle de cohésion et se retrouvent au début des ailes. Ils sont ensuite rabattus par les ailes pour se retrouver dans son axe de symétrie, au niveau du carré de ventre. Le temps passant, les poissons se laissent partir l'intérieur du chalut (dans ces simulations par grégarité et non par fatigue). S'ils ne peuvent pas s'échapper, finissent leur

course dans la poche. La Figure 2 semble montrer un comportement d'ensemble émergeant des règles individuelles : l'ensemble des individus se trouve freiné dans son entrée vers le gorget.

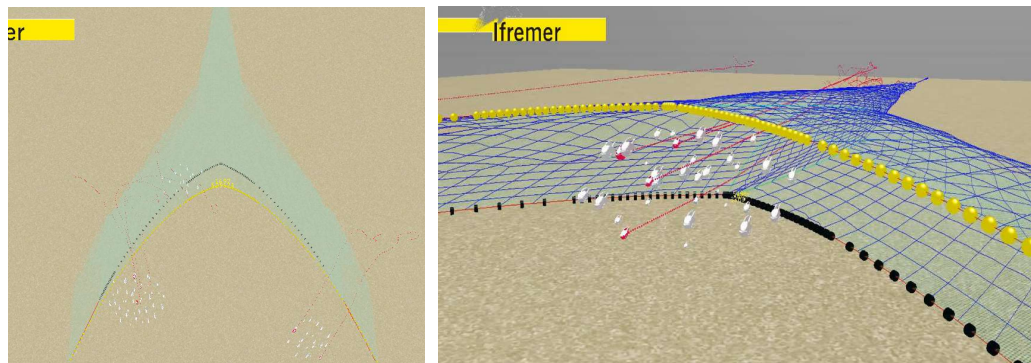


Figure 1 : Les ailes ont rabattu les poissons dans l'axe du chalut au niveau des carrés.

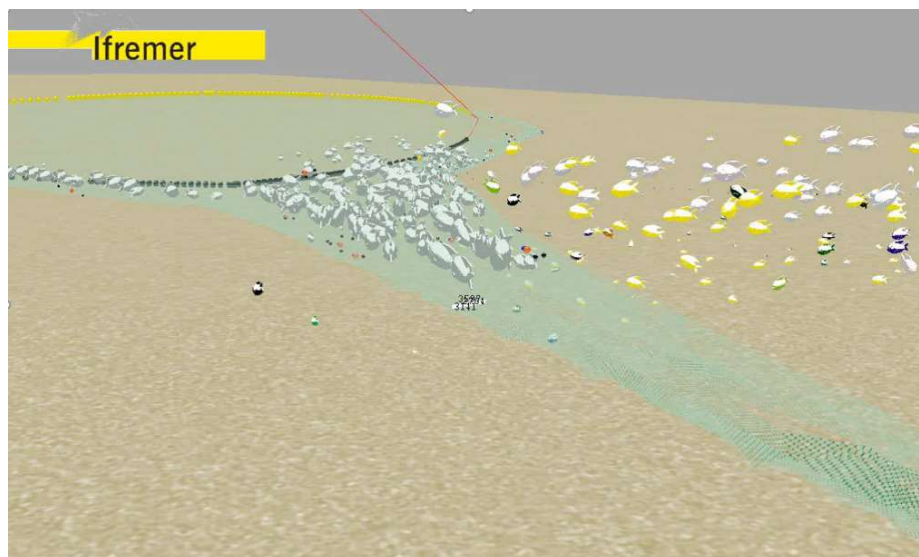


Figure 2 : L'effet d'étrangement du chalut provoquerait un ralentissement de l'ensemble des poissons et les maintiendrait au niveau du gorget.

Les résultats obtenus par le modèle simplifié selon 0 sont présentés sous la forme d'une courbe de sélectivité (Figure 4) : nombre d'individus retenus en fonction de leur taille. On retrouve la forme d'une courbe de sélectivité de type sigmoïde et un CS réalistes. La Figure 3 donne un aperçu de la forme de la rallonge et du cul à la base de la simulation.

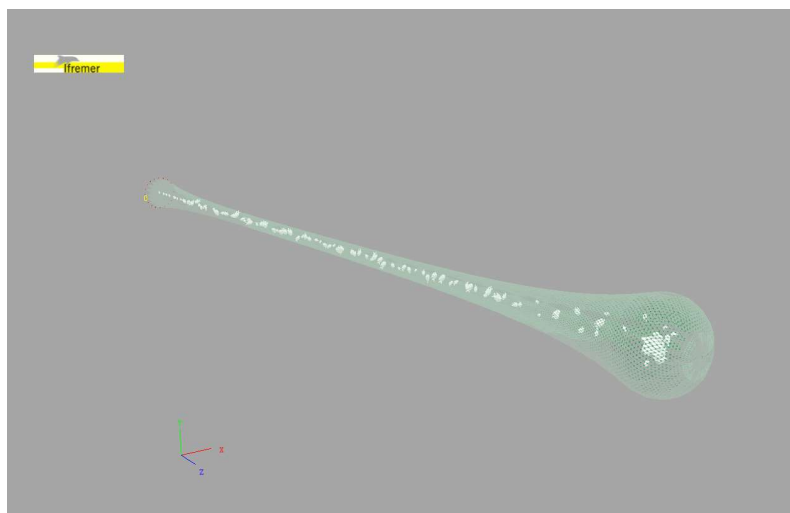


Figure 3 : Simulation d'une rallonge et d'un cul pour le modèle simplifié.

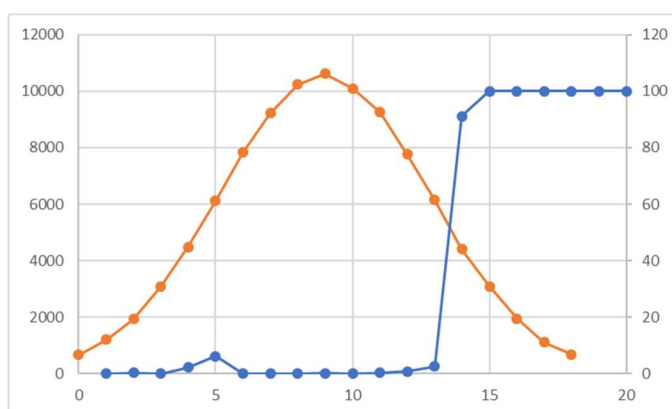


Figure 4 : distribution de tailles (orange) entrant dans la rallonge exprimée en nombre d'individus (ordonnées) et par classes de tailles (abscisses). Pourcentage d'individus retenus (bleu) pour chaque classe de taille. La simulation donne $L50=0.317$ m et $Cs=2.64$ (L50/MS).

3.4 Conclusions & prospective sur les modèles de comportement

L'approche théorique originale qui couple l'engin de pêche et les comportements permet de reproduire des observations assez courantes (rabattement et concentration des poissons devant le carré de ventre d'un chalut par exemple). Cependant elle souffre d'un déficit de connaissances pour quantifier ces règles. On pourra envisager dans des travaux ultérieurs d'optimiser ces règles (identifier leur paramètres) de façon à reproduire des expériences simples qui seront à concevoir soigneusement, en limitant le nombre de paramètres.

4 Simulation de structure et interaction mécanique entre filet et poisson

Cette partie des travaux a pour seul thème la mécanique et a pour objectif de répondre à cette question : est-ce qu'un poisson ayant une force de propulsion donnée, peut ou non passer à travers une maille de dimensions (coté, diamètre de tresse) et chargement donnés (forces dans le sens normal et dans le sens transverse). Les aspects théorique et expérimental sont abordés.

Cet aspect du projet a été motivé par les résultats du rapport UE PREMEC montrant que le rapport entre la géométrie d'un poisson et celle de la maille est le paramètre principal expliquant la réussite ou non des tentatives d'échappement de certains gadidés. La composante « dynamique » (prise en compte des forces du poisson et dans les mailles) est prise en compte pour la première fois à l'occasion de ces travaux.

4.1 Modélisation

4.1.1 Modélisation de la raideur à l'ouverture des mailles

La raideur à l'ouverture (ou à la fermeture) des mailles de filets dépend de la rigidité en flexion des tresses de filet et de la manière dont elles sont « encastrées » dans les nœuds de filet. Ces effets mécaniques devaient être pris en compte dans la modélisation des filets pour affiner le calcul des efforts de résistance qui interviennent lors de la tentative de passage d'un poisson dans une maille de filet.

La prise en compte de ces efforts de flexion le long des tresses et à l'encastrement des nœuds a nécessité une refonte du programme de génération de maillage virtuel (modélisation structurelle des nœuds) et des modèles d'efforts internes aux mailles dans le code de calcul de filet. Le temps consacré à cette étude (modélisation, codage et expérimentation, valorisation) représente plusieurs mois et a participé à dépasser très largement le temps initialement prévu dans la partie SCOTCH du projet FUSION.

Un article scientifique a été proposé dans la revue Elsevier Ocean Engineering et accepté en mars 2020 : Development of a model for flexural rigidity of fishing net with a spring mass approach and its inverse identification by metaheuristic parametric optimization. B. Vincent (1), J. Simon (1), N. Di Cesare (2) (1) IFREMER-STH/LTBH, Station de Lorient, 8 rue François Toullec, 56100 Lorient, France (2) Univ. Bretagne-Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France. Une copie de cet article est jointe à ce rapport final.

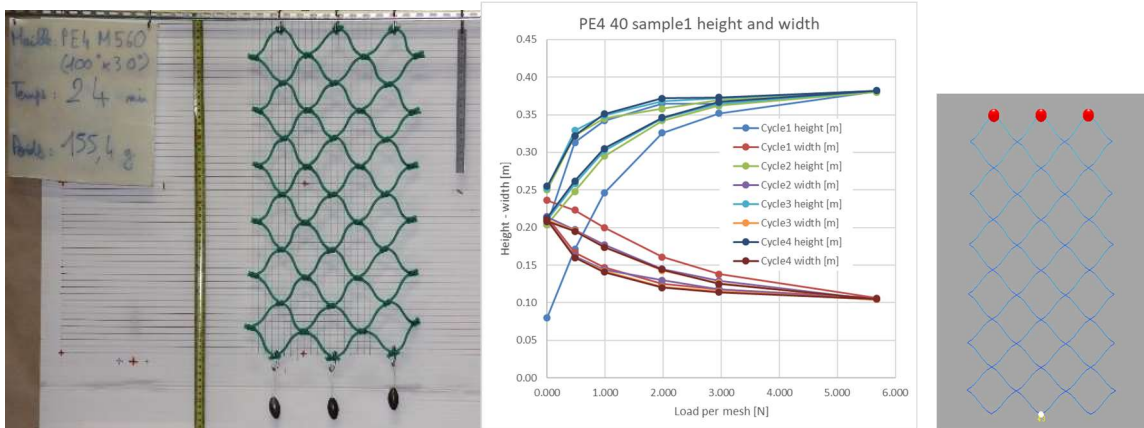


Figure 5 : Etablissement d'une relation chargement / déformation pour une petite nappe de filet PE 3x 6 mailles. Les valeurs de la raideur et des paramètres dimensionnels (angle au repos et longueur du nœud) sont ensuite obtenues par optimisation numérique d'un modèle de filet à partir de ces mesures.

Des maquettes cylindriques ont ensuite été construites (29 mailles de périmètre par 30 mailles de hauteur). Leurs déformations (hauteur, plus petit diamètre et sa position, diamètre dans le bas de la maquette) sous différents chargements ont été relevés. La plasticité de la maquette oblige à faire plusieurs cycles de mesure.

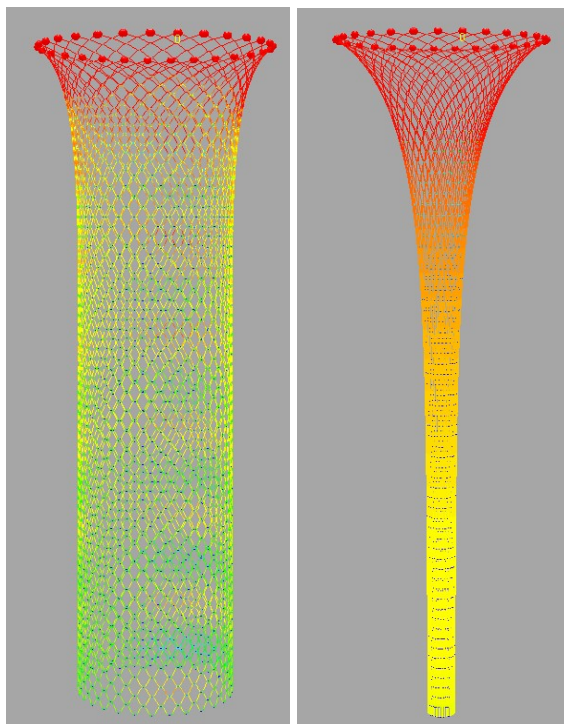


Figure 6 : Forme simulée d'une maquette de filet (PE 4mm x 40mm) monté en T90) avec prise en compte des raideurs en flexion (à gauche) et sans (à droite).

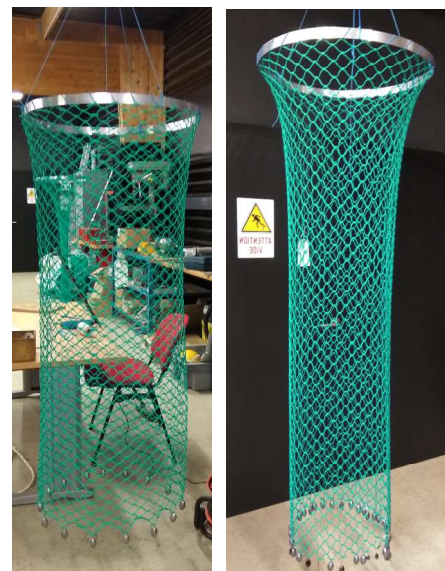


Figure 7 : Maquettes de formes cylindriques

4.1.2 Modélisation du passage d'un poisson idéalisé

Les premières modélisations concernent la pénétration d'un cône en plastique rigide (POM) dans une maille. Les dimensions et la géométrie parfaitement définies du cône permettent de simplifier la modélisation de la collision entre les tresses de la maille et le contour de ce « poisson » idéalisé. Ce problème de collision est relativement simple dans le cas d'un profil circulaire qui est facilement modélisable par une équation de cercle. Le modèle a été validé à partir d'expériences sur un banc de traction de maille dans ses 2 directions N et T.

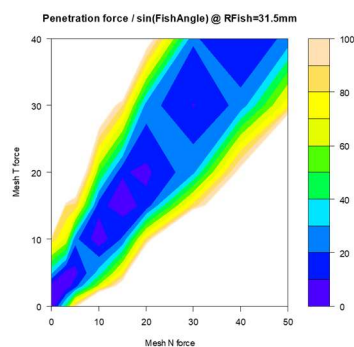


Figure 8 : résultats de simulation pour le cône : carte de force nécessaire pour réussir à pénétrer une maille chargée par une force N (abscisse) et une force T (ordonnées)

4.1.3 Modélisation du passage d'un poisson dans une maille de filet

Pour décrire le profil quelconque d'un poisson, les descripteurs de Fourier ont été utilisés. Le processus consiste à congeler un poisson, le couper au niveau de la supposée plus grande section non déformable (partie osseuse), tracer le contour sur une feuille, numériser ce contour et identifier un nombre de descripteurs suffisants à partir du tracé de ce contour. Là encore, un logiciel dédié a dû être développé.

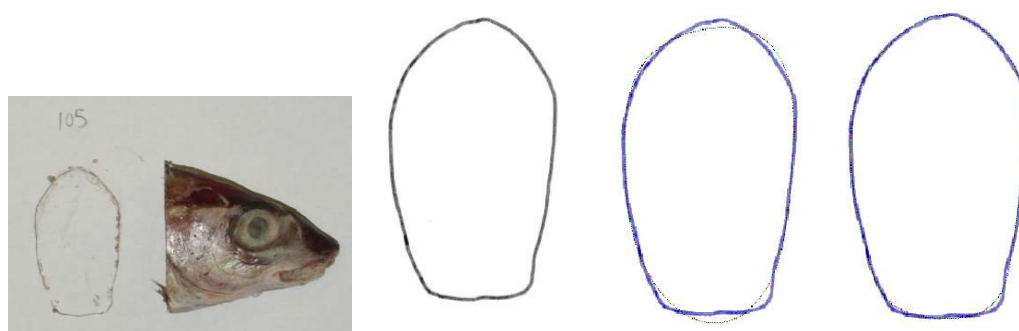


Figure 9 : Plus grande section du poisson relevée manuellement, numérisation du contour en noir, forme recalculée par 6 descripteurs puis 10 descripteurs (trait fin en noir ajouté au trait bleu du profil d'origine).

L'étape de modélisation suivante consiste à faire un lien entre force de pénétration et forces d'écartement de la maille (ou forces de résistance à l'ouverture de la maille). Dans l'hypothèse où le poisson est assimilé à un cône, et qu'on suppose qu'il n'y a pas de frottement entre le poisson et les tresse de la maille, cette relation fait intervenir uniquement l'angle du cône. Dans le cas d'un poisson on peut optimiser l'angle pour retrouver les valeurs de forces N et T permettant le passage.

4.2 Expérimentation et comparaison avec la théorie

Un banc de traction a été développé pour le projet afin d'obtenir des références expérimentales pour valider le code de calcul. Le banc fonctionne pour une unique maille. Son principe est d'imposer, dans un premier temps, un chargement constant dans le sens N et dans le sens T. Le déplacement dans le sens N est alors bloqué. Dans un second temps, l'opérateur essaie de faire passer un poisson sous l'effet de son poids, en augmentant de manière itérative la force T jusqu'à la réussite du passage. Le couple de force N et T est alors enregistré. L'allongement de la maille dans le sens N est empêché, par contre la maille peut s'ouvrir dans le sens T (pas de rigidité dans le sens de l'ouverture). Le chargement de la maille est donc modifié du fait de sa déformation (sens N et T) lors de la tentative de passage. Ce chargement transitoire n'est pas mesuré.

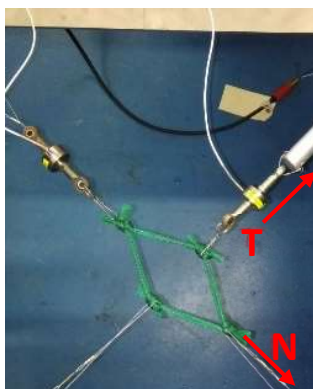


Figure 10 : banc de traction permettant de déformer la maille dans les directions T et N.

4.2.1 Cône comme modèle simplifié d'un poisson

De façon à standardiser l'objet à faire passer dans la maille et aussi à simplifier la modélisation, les premiers tests ont été réalisés avec un cône en POM avec une faible rugosité de surface pour pouvoir négliger les frottements.

Les essais ont été faits pour une maille de 60mm de côté et un diamètre de tresse 3mm en PE. Il ressort une relation linéaire entre la force T et la force N établissant la limite au-delà de laquelle le cône passe sous l'effet de son poids.

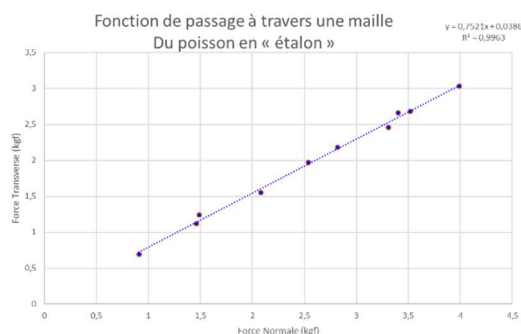


Figure 11 : Résultats expérimentaux obtenus avec un cône de diamètre maximum 60mm et angle de 5.71° (tangente = 0.1) pour une maille de PE4x60.

Les écarts relatifs entre résultats de simulation et résultats expérimentaux sont donnés dans le Tableau 1.

forceT (N)	forceN (N)	DiffRelative% expé/num Force N
7.37	5.76	2.67
9.77	7.56	2.07
12.16	9.38	1.51
14.54	11.20	1.04
16.92	13.03	0.60
19.29	14.86	0.17
21.66	16.71	-0.23
24.01	18.57	-0.71
26.33	20.48	-1.47
28.63	22.39	-2.19
30.93	24.33	-2.92
33.22	26.26	-3.54
35.51	28.20	-4.10
37.80	30.14	-4.65
40.07	32.10	-5.17

Tableau 1 : écarts relatifs expérience / simulation pour le cône.

4.2.2 Poisson réel

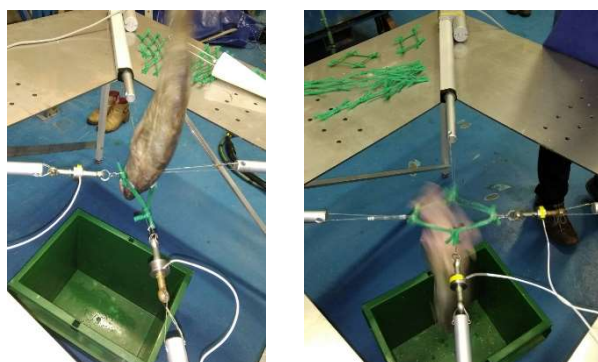


Figure 12 : Essai de passage d'un poisson, échec à gauche, et réussite à droite (les 2 cas de chargement sont différents)

Près de 40 poissons (églefins, merlans, merlus, morue) ont été testés sur ce banc. Il faut compter environ 45 minutes en moyenne par poisson pour effectuer les tests de passage pour tous les couples de forces.

Espèce	Maille	Nombre	LongMin	LongMax
Morue	PE3x70 T0	7	415	535
Merlan	PE3x60 T0	9	230	325
Merlu	PE3x60 T0	9	300	445
Eglefin	PE3x60 T0	7	305	335
Eglefin	PE3x60 T90	7	305	335

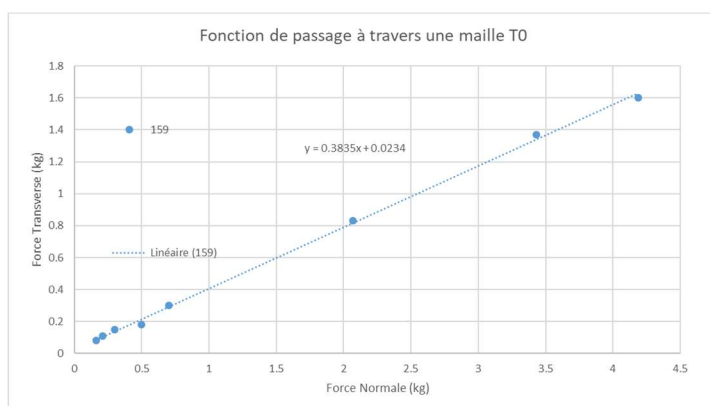


Figure 13 : Résultat du banc d'essai pour un poisson particulier.

La comparaison à la théorie nécessite la détermination d'un angle pour établir la relation entre force de propulsion et force d'écartement de la maille. Le choix arbitraire d'un rapport de 10 entre pénétration et écartement donne les résultats Figure 14, avec différentes hypothèses pour la représentation du poisson (profils « Fourier » ou ellipse dégénérée de ce profil, avec ou sans respect du périmètre mesuré).

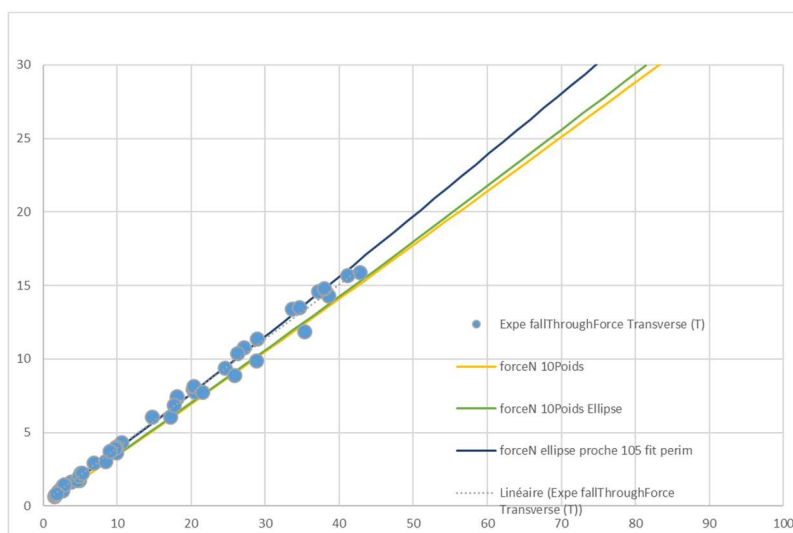


Figure 14 : comparaison expérience / théorie dans l'identification des limites de forces de maille permettant le passage des poissons testés. Les 7 églefins de longueur relativement similaires (305 – 335 mm) sont représentés sur ce graphe.

4.3 Conclusion et prospective sur l'approche mécanique

L'approche par modélisation numérique de la relation mécanique entre poisson et filet reproduit bien les expériences et semble prometteuse et probablement d'application plus large et plus réaliste que les essais « fall through » habituels. Par exemple aux petits chargements, les simulations montrent que des cercles de diamètres plus grands d'environ 15% continuent à passer dans la maille à condition de la déformer ce qui n'est pas possible en expérience de « fall through » en gabarits rigides. Cela a potentiellement un impact important sur la prédiction de la sélectivité.

5 Enquêtes auprès des professionnels

Afin de compléter les observations vidéo et améliorer le réalisme des simulations numériques, des entretiens ont été réalisés auprès de patrons pêcheurs afin de recenser leurs connaissances empiriques sur le sujet. Ces derniers travaillent au chalut de fond et ciblent des espèces démersales et benthiques, ce sont des pêcheries multi-spécifiques qui doivent faire face à des captures d'espèces non ciblées devenant des potentiels rejets.

5.1 Entretiens avec les professionnels

5.1.1 Questionnaire et déroulement de l'entretien

Afin de recenser les connaissances empiriques des patrons de chalutiers de fond sur les comportements des espèces capturées face à l'engin de pêche, un questionnaire semi-directif a été mis au point en 2017 par le comité de pilotage du projet FUSION qui vise à qualifier

- Le comportement du poisson dans les différentes parties du chalut
- Les caractéristiques techniques de l'engin qui facilitent l'échappement du poisson
- Les paramètres environnementaux qui peuvent influencer l'échappement du poisson

Avec chaque professionnel, ce questionnaire a été rempli autant de fois que le nombre d'espèces pour lesquelles il y a eu une discussion.

5.1.2 Les professionnels rencontrés

Les 14 professionnels rencontrés exercent à partir de différentes régions du golfe de Gascogne (Figure 15). Ils pêchent tous au chalut de fond. Sept d'entre eux utilisent uniquement des chaluts jumeaux, cinq sont armés toute l'année au chalut simple et deux d'entre eux alternent entre chaluts jumeaux et chalut simple en fonction des saisons et des espèces ciblées. Leurs zones de pêche varient : la majorité d'entre eux travaillent uniquement dans le golfe de Gascogne, trois travaillent dans le golfe de Gascogne et en Mer Celtique, deux en Manche et en Mer Celtique, deux uniquement en Mer Celtique et un en Ouest Irlande.

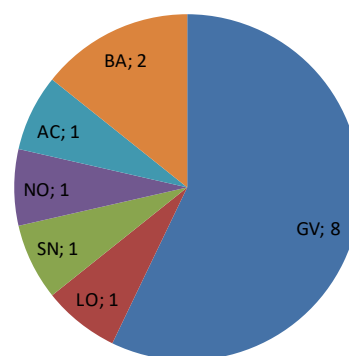


Figure 15 : Répartition des patrons rencontrés par quartier d'immatriculation

Les patrons rencontrés ciblent principalement les baudroies, le plus souvent capturées en même temps que la cardine et les raies. Les autres espèces ciblées sont principalement l'encornet, mais aussi la langoustine ou l'églefin. Ces trois espèces ne sont pas ciblées à la même période, ni par les mêmes navires.

5.2 Synthèse des réponses par espèces

Chaque patron a répondu au questionnaire pour une moyenne de 5,35 espèces différentes. Des questionnaires ont été remplis pour la liste des espèces suivantes (Tableau 2) :

Espèce étudiée	Nombre de réponses
Baudroies	10
Merlu	9
Cardine	7
Eglefin	7
Encornet	6
Merlan	5
Raies	5
Rouget barbet	5
Sole	5
Chinchard	4
Maquereau	3
Seiche	3
Sanglier	2
Bar	1
Dorades	1
Encornet Rouge	1
Lieu jaune	1

Tableau 2 : Occurrence de questionnaires réalisés par espèces

On note que les principales espèces pour lesquelles il y a eu des discussions sont les baudroies, qui sont principalement ciblées par les professionnels rencontrés. De nombreuses réponses ont également été données pour le merlu, la cardine, l'églefin ou l'encornet.

L'ensemble des réponses par espèces est disponible dans le rapport final des enquêtes en annexe1 de ce rapport. Ne seront présentées ici les réponses que pour 2 espèces : la baudroie et le merlu.

5.2.1 Les Baudroies

Dix patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement des baudroies dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

L'ensemble de ces patrons indiquent que la baudroie est relativement passive devant le chalut car c'est un poisson qui est mauvais nageur de par sa morphologie. La baudroie décolle par l'action des maillettes voire du scoubidou, puis retombe dans le chalut. Certains professionnels indiquent que la baudroie suit le bateau en nageant vers l'entrée du chalut mais s'épuise très rapidement. D'autres patrons pensent qu'elle cherche à s'échapper sous les maillettes et le bourrelet mais la turbidité occasionnée l'effraie et elle reste donc au centre du couloir créé par les maillettes.

80% des professionnels ayant discuté sur la baudroie considèrent qu'elle est passive à l'intérieur du chalut, qu'une fois les ailes passées, elle va directement au fond dans le cul. Les deux autres professionnels estiment que la baudroie cherche à s'échapper dans le chalut. Pour l'un ça serait dans le ventre car une fois le gorget passé, elle n'a plus de place pour nager. Pour l'autre elle

continue à nager dans la partie droite en suivant le navire pour tenter de remonter le tunnel du chalut.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

80% des professionnels ayant répondu sur la baudroie n'en retrouvent pas de maillées dans le chalut. Les 20% restant retrouvent quelques fois des baudroies maillées dans le ventre du chalut. Ces réponses ne dépendent pas du maillage utilisé par les professionnels (variant du 100 au 150 mm dans le ventre du chalut). Les mailles sont trop petites pour que les individus puissent passer la tête. Cependant, quelques baudroies maillées par la queue sont parfois retrouvées.

Les professionnels s'accordent à dire que lorsque la baudroie cherche à s'échapper, elle se dirige vers le bas ou sur les côtés du chalut (Tableau 3). En effet, certains affirment qu'il n'y a pas de perte de baudroies dans les captures avec des chaluts présentant des gorgets ouverts sur le dessus ou des chaluts sans grand dos.

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le bas	5
Nulle part	4
Vers les côtés	2

Tableau 3 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement de la baudroie

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Il ressort des différentes réponses qu'un grand maillage pourrait faciliter l'échappement des baudroies (Tableau 4). Cependant, la morphologie de ces espèces nécessiterait l'utilisation de très grandes mailles pour assurer leur échappement. Cette option n'est pas envisageable dans le contexte d'une pêcherie multispécifique car cela engendrerait la perte de toutes les autres espèces. Toutefois, un professionnel indique qu'il assure une sélectivité intra-spécifique en permettant l'échappement des baudroies de petite taille grâce à un panneau maille carré de 100 mm de côté dans la partie ventrale du chalut.

La moitié des patrons note qu'une sélectivité interspécifique sur les baudroies pourrait avoir lieu en amont du chalut. En effet, l'utilisation de rockhoppers semble diminuer les captures de baudroies qui passent en dessous du bourrelet. La diminution de la longueur des maillettes est également citée comme une stratégie de limitation des captures de baudroies par un patron qui estime que c'est au moment du rabattement que ces espèces s'échapperaient le plus. L'utilisation de grandes ailes inférieures est également mentionnée comme favorisant la capture des baudroies.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	7
Type de bourrelet	5
Forme de la maille	4
Vitesse de chalutage	3
Dispositif sélectif	2

Tableau 4 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement de la baudroie

Enfin, la vitesse de chalutage est indiquée comme ayant un effet sur la capturabilité des baudroies qui serait meilleure à petite vitesse (entre 2 et 3 nds).

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Les réponses apportées indiquent que lorsqu'il y a du mauvais temps, le chalut se décolle davantage du fond, permettant un

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Aucun	6

échappement plus important des baudroies sous le bourrelet avant l'entrée dans le chalut. De plus, les ondulations du chalut provoquées par le mauvais temps entraînent une déformation des mailles qui s'ouvrent et qui favorisent l'échappement de manière générale.

Mauvais temps	4
Sens de traîne/courant	1
Saison	1

Tableau 5 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement de la baudroie

Enfin, le mauvais temps ou le sens de traîne à contre courant diminue la vitesse de traîne et favorise également l'ouverture des mailles et donc l'échappement. D'autre part, de décembre à avril ces poissons bougent davantage, ils sont plus actifs dans leur déplacement. Ce paramètre pourrait influencer sur l'échappement de ces espèces.

Cependant, la majorité des réponses données (plus de 50%) n'établit pas de lien entre les paramètres environnementaux et l'échappement de la baudroie (Tableau 5).

5.2.2 Le Merlu

Neuf patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement du merlu dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

D'après les réponses qui ont été données, le merlu est un poisson qui est actif devant le chalut et qui va chercher à fuir. Plus de la moitié des réponses indique que le merlu nage en suivant le navire et finira par être capturé par fatigue. Les autres mentionnent un comportement de fuite de cette espèce qui va « piquer vers le haut » et passer par-dessus le chalut. Une dernière réponse déclare que le merlu cherche à fuir par les côtés.

Excepté une réponse qui mentionne que le merlu ne cherche pas à fuir dans le chalut et qu'il suit le flux d'eau jusqu'au cul de chalut, les autres patrons s'accordent sur le contraire. Ces derniers affirment qu'avant le gorget, le merlu cherche à s'enfuir vers le haut, il est retrouvé maillé dans le dos. Après le gorget, le merlu ne peut plus s'échapper car le maillage est trop petit, excepté à travers le panneau maille carrée « merlu » réglementaire (100 mm de côté de maille) par lequel il s'échappe et dans lequel il peut être retrouvé maillé.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

L'unanimité mentionne que le merlu s'échappe vers le haut (Tableau 6).

Il est retrouvé maillé dans le grand dos, le petit dos (maillages de 100 à 120 mm) et le panneau maille carrée réglementaire « merlu ». Trois professionnels indiquent retrouver du merlu maillé dans le cul de chalut également (maillages 70 et 100 mm) et deux professionnels relèvent du merlu maillé dans les ailes supérieures du chalut (maillages 150 et 160 mm).

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le haut	9

Tableau 6 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement du merlu.

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Le panneau à mailles carrées réglementaire « merlu » est le principal dispositif cité comme permettant une sélectivité intra-spécifique sur cette espèce. La forme des mailles carrées et son emplacement assure un échappement des petits individus. Un professionnel explique qu'à l'endroit où ce panneau à mailles carrées est placé (juste après le gorget), il y a un resserrement de la forme du chalut qui oblige les poissons à passer devant ce dispositif.

Un maillage en T90 en 100 mm est également nommé par 2 professionnels pour assurer une sélectivité intra-spécifique de l'espèce (Tableau 7). Il est évoqué qu'avec la mise en place d'un grand maillage en maille losange dans le dos et le gorget, il y a moins de merlus maillés à ces endroits. Un pêcheur indique que la filtration du chalut influence le maillage du merlu : moins il y a de turbulence dans le flux d'eau, moins le poisson aura de contacts avec les mailles du chalut, donc il y aura moins d'échappement.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	8
Forme de la maille	8
Vitesse de chalutage	4
Dispositif sélectif	3
Rencontre avec le chalut	1
Lumière	1

Tableau 7 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement du merlu.

Enfin, il est reconnu par de nombreux professionnels questionnés que plus le navire est lent, moins il pêche de merlus. En effet, plus le navire est lent, plus les mailles auront tendance à s'ouvrir et à laisser échapper les merlus

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

D'autre part, l'explication au paramètre « saison » est qu'au printemps, les merlus étant plus petits, ils peuvent plus facilement passer à travers les mailles. Enfin, dans certaines zones de pêches plus vaseuses, lors des périodes à grands coefficients de marée, les eaux sont plus sales et agitées, alors le chalut a tendance à onduler, favorisant l'ouverture des mailles et l'échappement de merlus.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Mauvais temps	5
Sens de traîne/courant	3
Aucun	3
Coefficient de marée	1
Saison	1

Tableau 8 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement du merlu.

Le mauvais temps est le premier facteur favorisant l'échappement (Tableau 8) pour 2 raisons : 1) le navire a une vitesse réduite et donc le merlu a tendance à s'échapper ; 2) le chalut ondule avec la houle, entraînant une ouverture des mailles et favorisant l'échappement.

Le sens de traîne contre le courant diminue également la vitesse du navire et favorise donc l'échappement du merlu.

Cependant, trois réponses données n'établissent pas de lien entre les paramètres environnementaux et l'échappement du merlu.

6 Annexe 1 : présentation « étude du comportement d'échappement des poissons face aux engins de pêche »




ETUDE DU COMPORTEMENT D'
ÉCHAPPEMENT DES POISSONS
FACE AUX ENGIN DE PÊCHE:
CAS DES ÉGLEFINS PÊCHÉS AU
CHALUT DEMERSAL

Marianne Robert, Aurore Cortay, Marie Morfin, Fabien
Morandeau, Benoit Vincent, Jean Louis Deneubourg

^a *Ifremer, Unité de Sciences et Technologies halieutiques, Laboratoire de Technologie et Biologie
Halieutique, 8 rue François Toullec, 56325 Lorient Cedex, France.*

marianne.robert@ifremer.fr

 Objectif de la gestion des pêches


Minimiser les impacts de l'exploitation des ressources marines sur les écosystèmes tout en maximisant les revenus des acteurs

 Afin d'optimiser l'utilisation des ressources marines et minimiser les déchets/rejets

Sélectionner les espèces que l'on souhaite capturer
Trier sur le fond et pas sur le pont





 Objectif de la gestion des pêches

Minimiser les impacts de l'exploitation des ressources marines sur les écosystèmes tout en maximisant les revenus des acteurs

 Afin d'optimiser l'utilisation des ressources marines et minimiser les déchets/rejets



Sélectionner les espèces que l'on souhaite capturer
Trier sur le fond et pas sur le pont

 La sélectivité des pêcheries mixtes

Intra spécifique



Taille à première maturité => préserver les capacités reproductrices des stocks

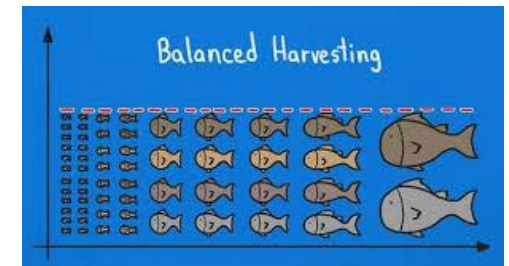


Effet maternel

Inter spécifique

Espèces cibles à forte valeurs commerciales

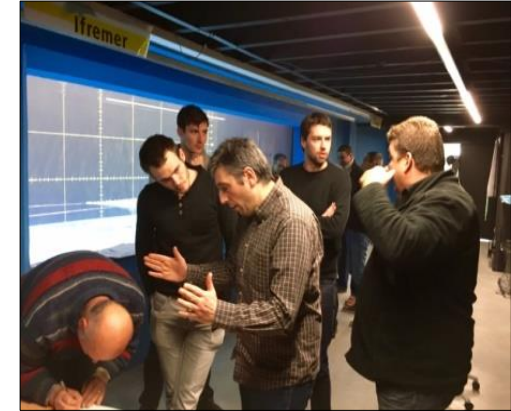
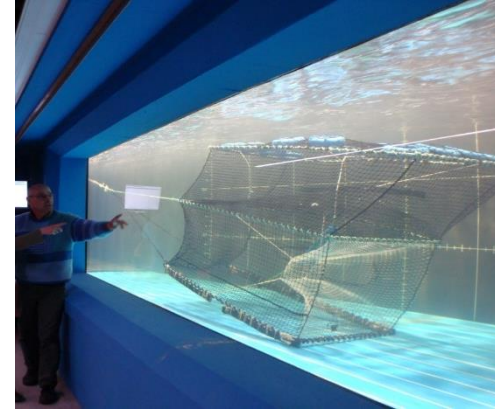
« Balanced harvest »



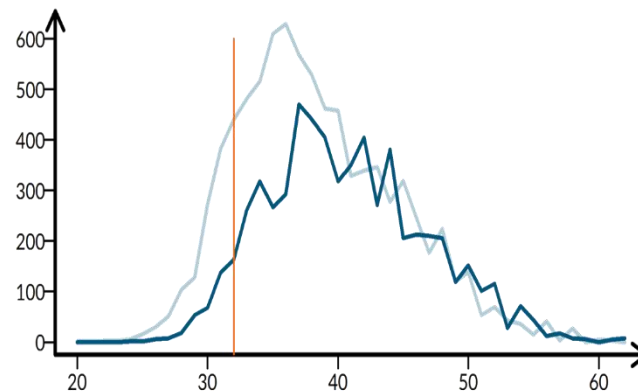


Amélioration de la sélectivité des engins de pêche

- Co définition des besoins: pêcheries, espèces/tailles cibles et non désirées
- Co identification de solutions potentielles



- Test des dispositifs sélectifs sélectionnés
- Quantification des gains et pertes





Axe de recherche en sélectivité :

Observer, comprendre et modéliser les processus de capture et d'échappement des organismes



Axe de recherche en sélectivité :

Observer, comprendre et modéliser les processus de capture et d'échappement des organismes



Objectif de l'étude :

Etudier le comportement des églefins dans les chaluts demersaux ainsi que leurs processus d'échappement au travers d'un dispositif sélectif de type cylindre à maille carrée



Axe de recherche en sélectivité :

Observer, comprendre et modéliser les processus de capture et d'échappement des organismes



Objectif de l'étude :

Etudier le comportement des églefins dans les chaluts demersaux ainsi que leurs processus d'échappement au travers d'un dispositif sélectif de type cylindre à maille carrée



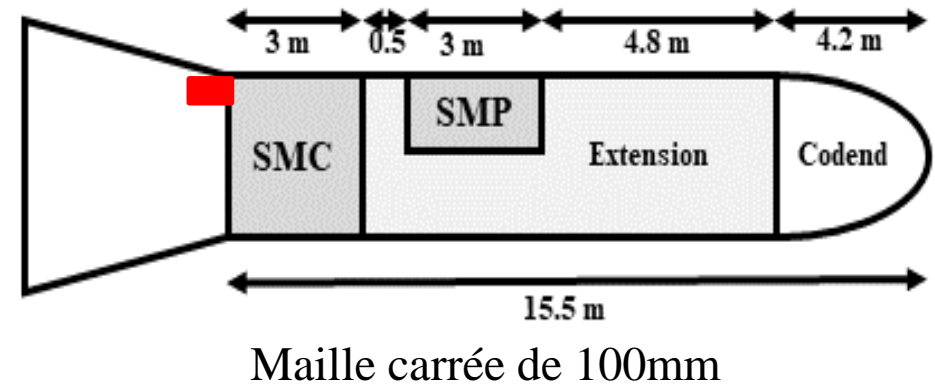
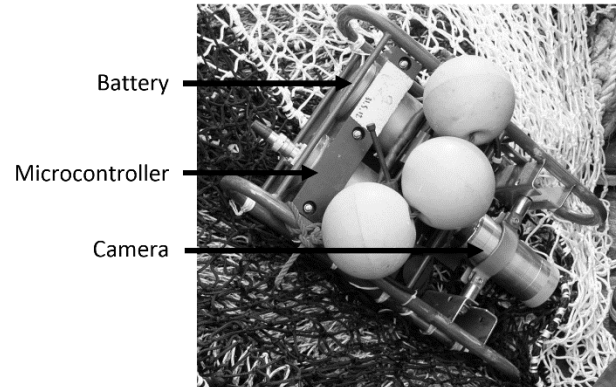
- Observations vidéos : méthode directe d'observation

permet de découper les différentes phases du processus de capture

probabilité de contact avec une maille * probabilité de succès

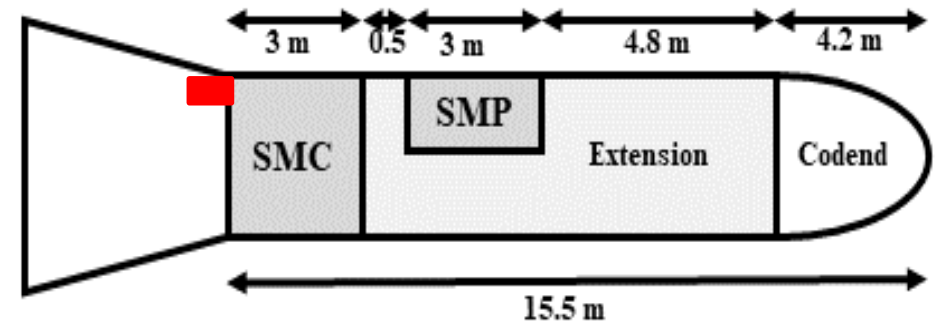
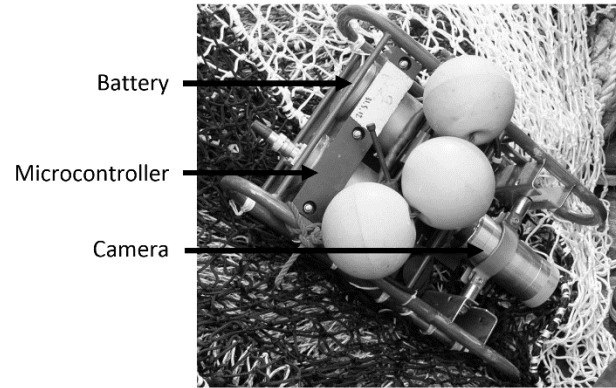


■ VECOC (Video Embarquée de Contrôle et d'Observation de Chalut)



Projet Celselect – Project Scotch-Fusion

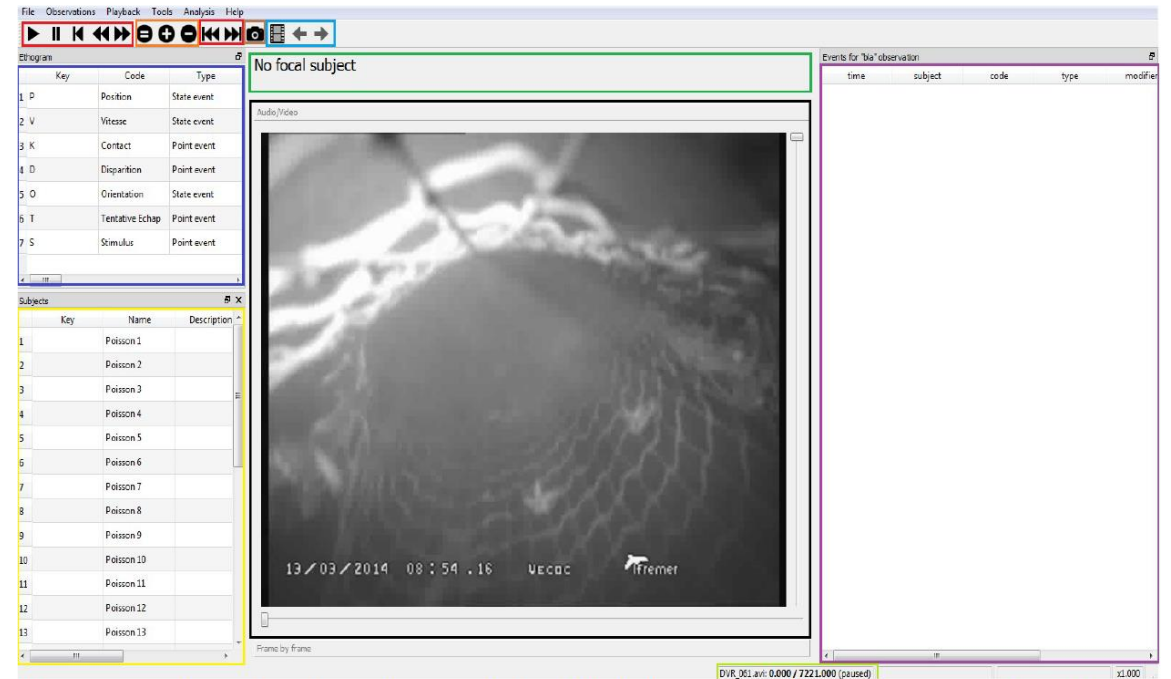
■ VECOC (Video Embarquée de Contrôle et d'Observation de Chalut)



Maille carrée de 100mm



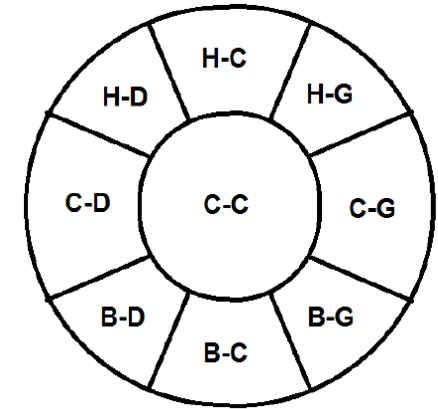
5 min au bout d'1h de traine
5 min au bout de 2h de traine





Suivi individuel de chaque poisson

- Espèce
- Position / orientation / vitesse
- Actions : éthogramme
 - tentative d'échappement
 - succès / échec
- Environnement (visibilité - irrégularité chalut)

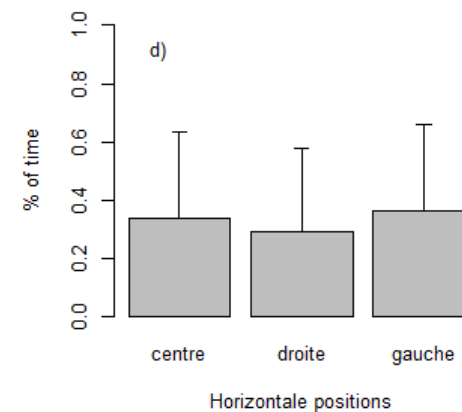
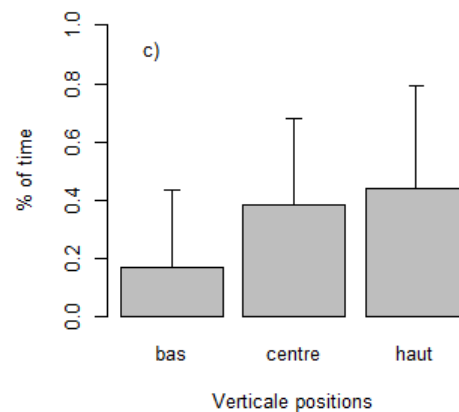
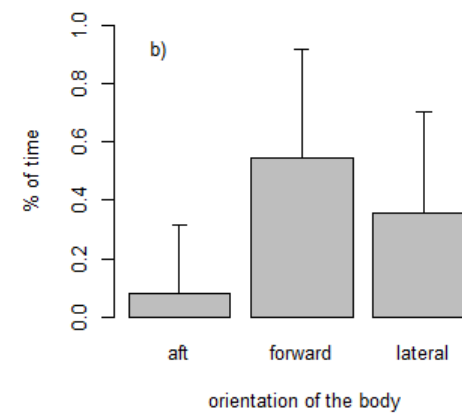
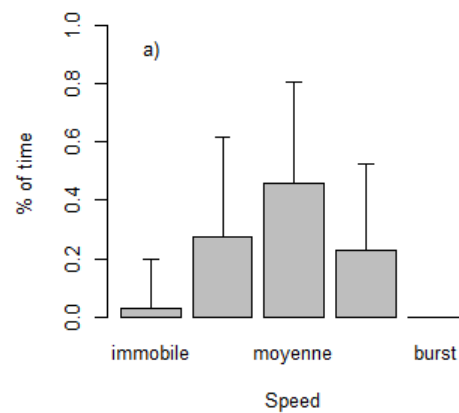


Observation id : 27 poissons
 Observation date : 18 mai matin

Time	Subject	Espec	Behavior	Modifie	Modifie	Modifie	Comment	Status	Quantite	Irreg	Autre
2576.76			Stimulus	irregularite env	beaucoup s			POINT	++	--	n
2576.76	425	Eglefin	Position	haut	gauche	1/3		START	++	--	n
2576.8	425		Orientation	forward	none			START	++	--	n
2576.8	425		Vitesse	moyenne				START	++	--	n
2577.239	425		Position	haut	gauche	1/3		STOP	++	--	n
2577.24	425		Position	centre	centre	1/3		START	++	--	n
2577.56			Stimulus	irregularite chalut	mvt ample			POINT	++	+	n
2577.839	425		Position	centre	centre	1/3		STOP	++	+	n
2577.84	425		Position	haut	gauche	1/3		START	++	+	n
2577.88			Stimulus	irregularite chalut	peu s			POINT	+	+	n
2578.08	425		Contact	chalut				POINT	+	+	n
2578.359	425		Orientation	forward	none			STOP	+	+	n
2578.359	425		Position	haut	gauche	1/3		STOP	+	+	n
2578.36			Stimulus	irregularite chalut	pas de mvt			POINT	+	--	n
2578.36	425		Orientation	forward	haut droite			START	+	--	n



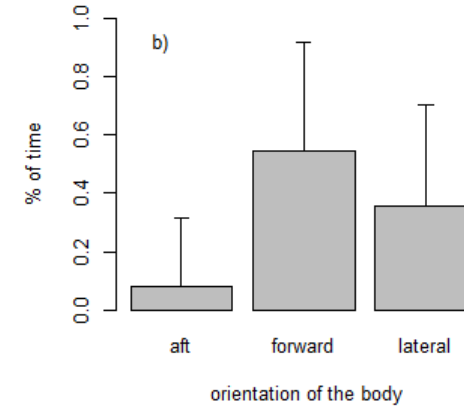
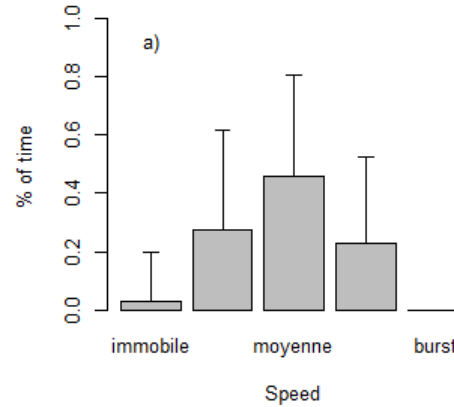
Églefins nagent préférentiellement





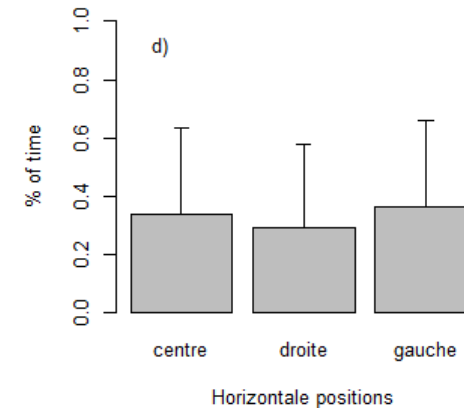
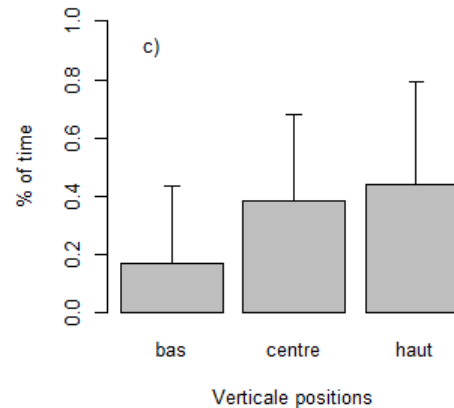
Églefins nagent préférentiellement

à la même vitesse que le chalut



contre le courant

dans la partie haute du chalut



sans préférence

Travail également sur la durée des comportements / Pas de différence majeures entre les deux séquences vidéos



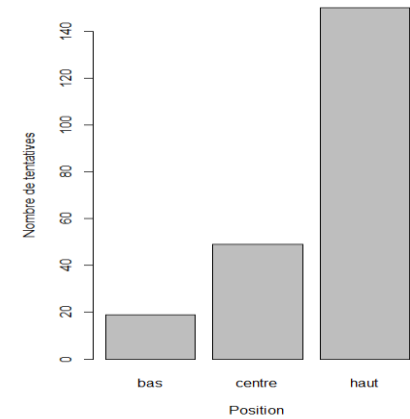
Comportement d'échappement : Tentative d'échappement ou probabilité de contact

Description

60% des églefins observés tentent de s'échapper au moins une fois (123/204)

En moyenne les poissons qui tentent de s'échapper le font 1.77 (+/-1.15) fois

Les échappements s'effectuent préférentiellement par le haut du cylindre





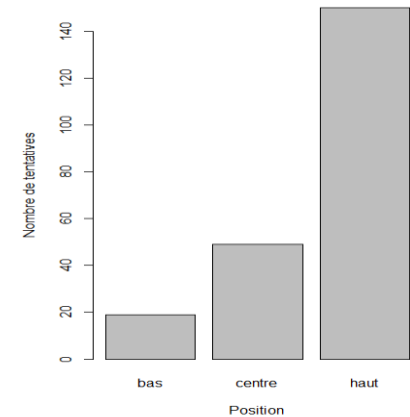
Comportement d'échappement : Tentative d'échappement ou probabilité de contact

Description

60% des églefins observés tentent de s'échapper au moins une fois (123/204)

En moyenne chaque poisson tente de s'échapper 1.77 (+/-1.15) fois

Les échappements s'effectuent préférentiellement par le haut du cylindre



Modèle paramétrique de Weibull permet

de modéliser la probabilité qu'un poisson tente de s'échapper au cours du temps
de prendre en compte

les données censurées par la droite

les durées variables d'observation entre poissons

qu'une partie des poissons ne tente pas de s'échapper

de tester l'effet de covariables



Comportement d'échappement : Tentative d'échappement ou probabilité de contact

- Modèle de Weibull

$$P(T>t)=S(t) = 1-\pi+ \pi*\exp(-(\alpha t)^\gamma)$$

π = proportion de la population qui tente de d'échapper

α = paramètre d'échelle : probabilité de faire une tentative d'échappement

γ = paramètre de forme : si $\gamma=1$, le processus d'échappement sous-jacent est une exponentielle (processus stationnaire)



Comportement d'échappement : Tentative d'échappement ou probabilité de contact

- Modèle de Weibull

$$P(T>t)=S(t) = 1-\pi+ \pi*\exp(-(\alpha t)^\gamma)$$

π = proportion de la population qui tente de d'échapper

α = paramètre d'échelle : probabilité de faire une tentative d'échappement

γ = paramètre de forme : si $\gamma=1$, le processus d'échappement sous-jacent est une exponentielle (processus stationnaire)

- ★ Test des effets du rang de la tentative et de la vidéo sur les paramètres π , α , γ

Comparaison des modèles à l'aide du critère d' Akaike



AIC le plus faible => modèle avec γ fixé à 1 et effet du rang sur α



Comportement d'échappement : Tentative d'échappement ou probabilité de contact

$\gamma=1$: La probabilité de contact est stationnaire cad constante au cours du temps

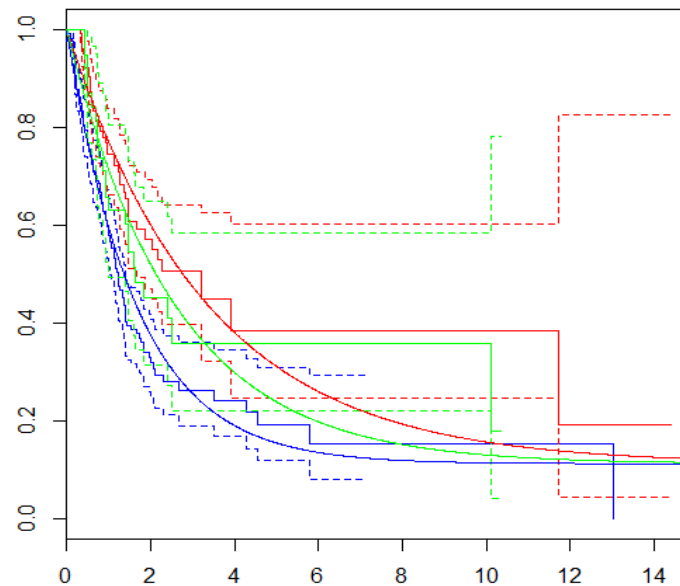
α (probabilité de contact) est fonction du rang de la tentative

$\alpha R1 = 0.6$ soit 1.66 s avant la première tentative

$\alpha R2 = 0.29$ soit 2.5 3 s entre la première et les autres tentatives successives d'un même poisson

$\alpha R3 = 0.38$

1/ α informe sur le temps moyen avant une tentative d'échappement : augmente entre deux tentatives



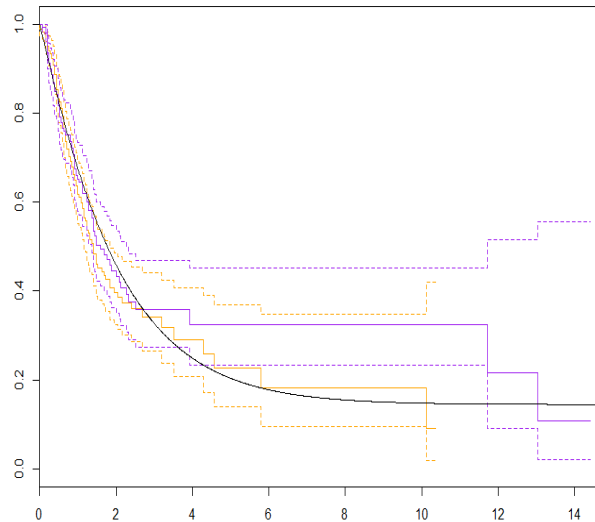


Comportement d'échappement : Tentative d'échappement ou probabilité de contact

- π = proportion de la population qui tente de s'échapper

88% des églefins tentent de s'échapper au moins une fois au cours de leur trajet dans le chalut

- Les processus et les estimations semblent identiques entre les deux vidéos





Comportement d'échappement : Probabilité de succès

- GLM binomial

- ★ Test des effets rang, vidéo et irrégularité du chalut sur la probabilité de succès

Comparaison du critère AIC des 7 modèles



AIC le plus faible => le modèle nul



Comportement d'échappement : Probabilité de succès

- GLM binomial

- ★ Test des effets rang, vidéo et irrégularité du chalut sur la probabilité de succès

Comparaison du critère AIC des 7 modèles



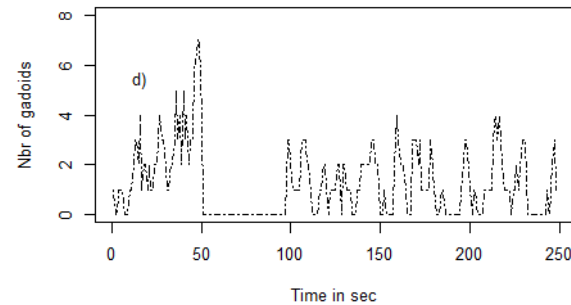
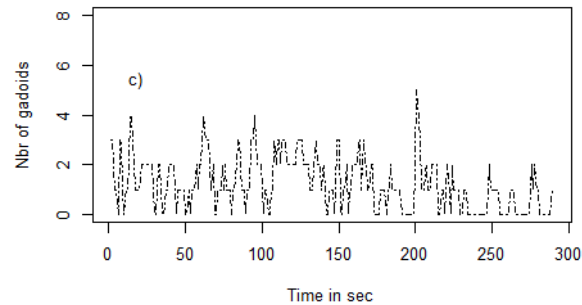
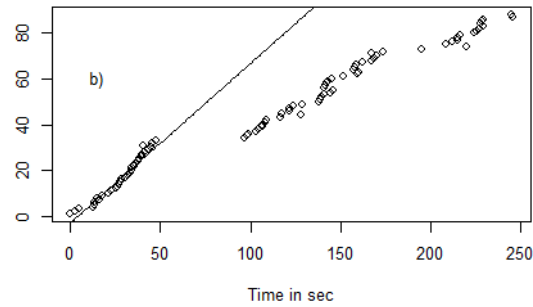
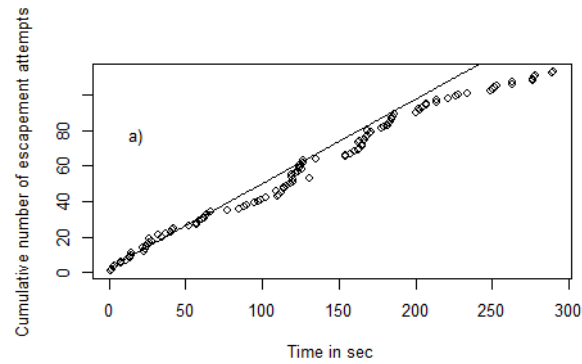
AIC le plus faible => le modèle nul

La probabilité de succès est constante au cours du temps,
la même sur les deux séquences vidéos
et ne semble pas influencer par les irrégularités du chalut

Elle est estimée à 18%



- 🐟 Estimer des paramètres utilisables dans des simulations numériques
- 🐟 Mieux identifier les processus mécanistes sous jacents : Dynamique temporelle



Arrivée des poissons non aléatoire mais en pulse
 VS
 Effet social d'entraînement – phénomène de suivi

On continue



Confronter les résultats à la littérature et rechercher d'autres paramètres susceptibles d'influencer le comportement d'échappement



Effet taille, congénère

On continue



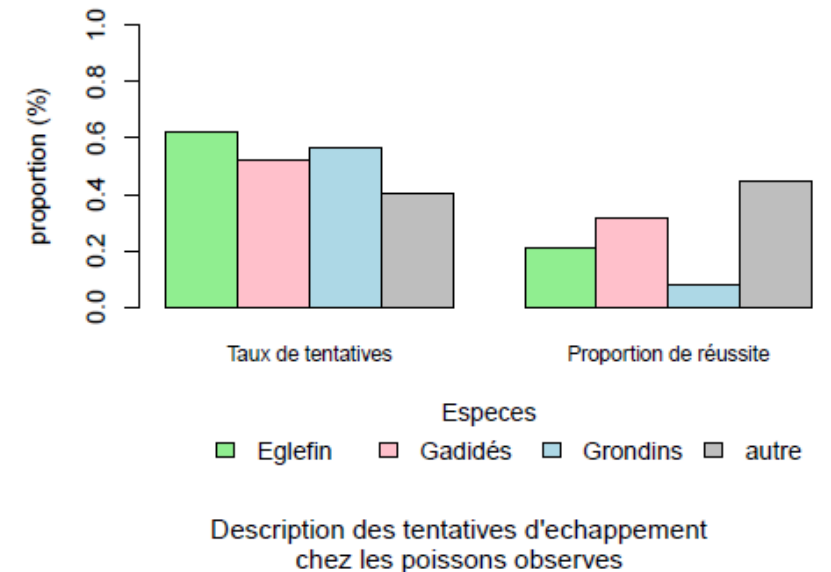
- Confronter les résultats à la littérature et rechercher d'autres paramètres susceptibles d'influencer le comportement d'échappement



Effet taille, congénère

- Etudier d'autres espèces dans les chaluts démersaux ex grondins

- Dépôt de projet ANR – Nouveau chercheur recruté



On continue



Autres cas d'applications

Nasses à poissons : Projet BAITFISH

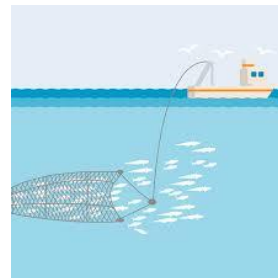
Processus d'attraction



Processus d'échappement

Processus capture

Chalut et espèces pélagiques





Merci de votre attention





7 Annexe 2 : enquêtes auprès des professionnels

Janvier 2019

RETOUR DES ENQUETES

**« Mieux connaître le comportement
des poissons dans le chalut »**

AUPRES DES PROFESSIONNELS DE LA PÊCHE

-

PROJET FUSION



Table des matières

Introduction.....	3
1 Entretiens avec les professionnels.....	4
1.1 Questionnaire et déroulement de l’entretien.....	4
1.2 Les professionnels rencontrés.....	4
2 Synthèse des réponses par espèces	6
2.1 La Baudroie (la Lotte)	7
2.2 Le Merlu.....	9
2.3 La Cardine	11
2.4 L’Eglefin.....	13
2.5 L’Encornet.....	15
2.6 Le Merlan.....	17
2.7 Les Raies.....	19
2.8 Le Rouget Barbet	21
2.9 La Sole.....	23
2.10 Le Chinchard	25
2.11 Le Maquereau.....	27
2.12 La Seiche	28
2.13 Le Sanglier.....	29
2.14 Le Bar	30
2.15 La Dorade.....	31
2.16 L’Encornet Rouge.....	32
2.17 Le Lieu Jaune.....	33
3 Conclusion et perspectives	34
Remerciements	35
Table des figures et tableaux	36
Annexe : Questionnaire.....	38

Introduction

L'un des enjeux majeur pour une meilleure gestion des pêcheries est la diminution des captures indésirées. Cet objectif est visé par la Politique Commune des Pêches (PCP) de 2013, notamment par la mise en œuvre de l'obligation de débarquement des espèces sous TAC. Pour cela, une des réponses est l'amélioration technologique de la sélectivité des engins de pêche afin de « trier sur le fond plutôt que sur le pont ». De nombreuses pêcheries en Europe sont à présent dotées de dispositifs sélectifs qui permettent de diminuer les prises d'espèces non désirées et les rejets. Dans le Golfe de Gascogne, les propriétés sélectives du chalut de fond et de dispositifs associés ont déjà été largement étudiées et font toujours l'objet d'amélioration. Tous avaient pour objectif la réduction des rejets, soit d'espèces non désirées (sélectivité inter-spécifique), soient d'individus inférieurs à la taille commerciale (sélectivité intra-spécifique). Cependant à ce jour, peu d'études permettent de comprendre pourquoi un poisson s'échappe ou non via un dispositif sélectif.

Ainsi, le projet FUSION a pour ambition de mieux comprendre le processus d'échappement des poissons au travers d'un dispositif sélectif. Un des objectifs du projet est de développer et calibrer les modèles numériques de comportement de poissons permettant de simuler la sélectivité d'un chalut pour certaines espèces. L'outil ainsi développé sera capable de fournir les paramètres de sélectivité qui seront comparés aux valeurs obtenues lors d'expériences de sélectivité en mer. Pour cela, les comportements des poissons dans les chaluts ont été observés sur des vidéos et les propriétés morpho-anatomiques et comportementales des individus qui leur permettent de passer à travers le dispositif ont été étudiées.

Pour compléter ces observations, des entretiens ont été réalisés auprès de patrons pêcheurs afin de recenser leurs connaissances empiriques sur le sujet. Ces derniers travaillent au chalut de fond et ciblent des espèces démersales et benthiques, ce sont des pêcheries multi-spécifiques qui doivent faire face à des captures d'espèces non ciblées devenant des potentiels rejets.

Le présent rapport synthétise les réponses apportées par les patrons rencontrés. Les données qualitatives issues de ces entretiens pourront inspirer les modèles ou règles de comportement pour améliorer le réalisme des simulations numériques et permettre d'orienter les futurs travaux à engager.

1 Entretiens avec les professionnels

1.1 Questionnaire et déroulement de l'entretien

Afin de recenser les connaissances empiriques des patrons de chalutiers de fond sur les comportements des espèces capturées face à l'engin de pêche, un questionnaire a été mis au point en 2017 par le comité de pilotage du projet FUSION.

Ce questionnaire sert de base pour des entretiens semi-directifs (cf. annexe) et vise à qualifier :

- Le comportement du poisson dans les différentes parties du chalut
- Les caractéristiques techniques de l'engin qui facilitent l'échappement du poisson
- Les paramètres environnementaux qui peuvent influencer l'échappement du poisson

Avec chaque professionnel, ce questionnaire a été rempli autant de fois que le nombre d'espèces pour lesquelles il y a eu une discussion. Les patrons ont apporté leurs connaissances pour des espèces qu'ils ciblent, mais aussi pour des espèces faisant l'objet de captures indésirées.

1.2 Les professionnels rencontrés

Les 14 professionnels rencontrés exercent à partir de différentes régions du golfe de Gascogne (Figure 1). Ils pêchent tous au chalut de fond. Sept d'entre eux utilisent uniquement des chaluts jumeaux, cinq sont armés toute l'année au chalut simple et deux d'entre eux alternent entre chaluts jumeaux et chalut simple en fonction des saisons et des espèces ciblées. Leurs zones de pêche varient (Figure 2) : la majorité d'entre eux travaillent uniquement dans le golfe de Gascogne, trois travaillent dans le golfe de Gascogne et en Mer Celtique, deux en Manche et en Mer Celtique, deux uniquement en Mer Celtique et un en Ouest Irlande.

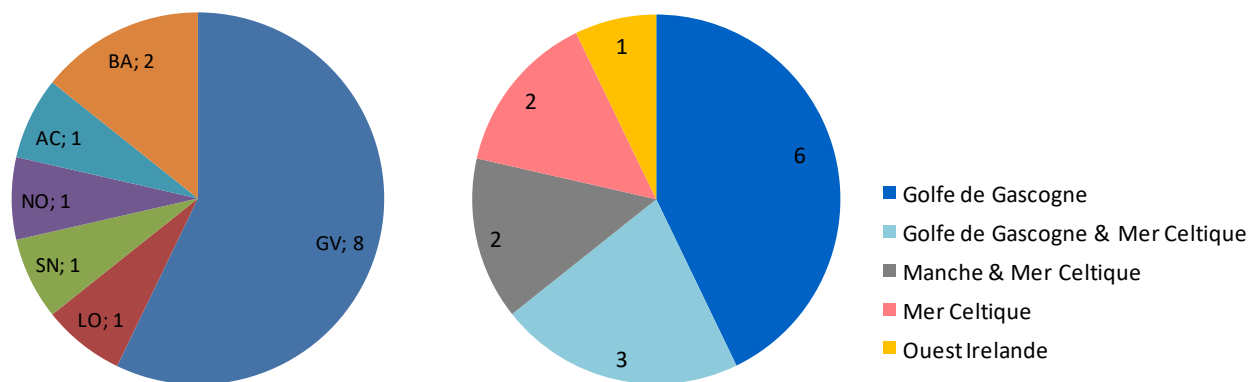


Figure 1 : Répartition des patrons rencontrés par quartier d'immatriculation

Figure 2 : Zone de travail des chalutiers des patrons rencontrés.

Un même navire peut cibler la même espèce toute l'année, ou alors changer d'espèce ciblée au fil des saisons. Dans ce dernier cas, les chaluts et les zones de pêche évoluent pour s'adapter à l'espèce ciblée.

Espèces ciblées	Nombre de réponses
Baudroies	10
Cardine	7
Raies	6
Encornet	4
Langoustine	4
Eglefin	3
Seiche	3
Sole	3
Dorades	2
Merlu	2
Saint-Pierre	2
Maquereau	1
Rouget barbet	1

Tableau 1 : Espèces citées comme étant ciblées par les patrons rencontrés.

Les patrons rencontrés ciblent principalement les baudroies, le plus souvent capturées en même temps que la cardine et les raies (Tableau 1). Les autres espèces ciblées sont principalement l'encornet, mais aussi la langoustine ou l'églefin. Ces trois espèces ne sont pas ciblées à la même période, ni par les mêmes navires.

2 Synthèse des réponses par espèces

Chaque patron a répondu au questionnaire pour une moyenne de 5,35 espèces différentes. Des questionnaires ont été remplis pour la liste des espèces suivantes (Tableau 2) :

Espèce étudiée	Nombre de réponses
Baudroies	10
Merlu	9
Cardine	7
Eglefin	7
Encornet	6
Merlan	5
Raies	5
Rouget barbet	5
Sole	5
Chinchard	4
Maquereau	3
Seiche	3
Sanglier	2
Bar	1
Dorades	1
Encornet Rouge	1
Lieu jaune	1

Tableau 2 : Occurrence de questionnaires réalisés par espèces

On note que les principales espèces pour lesquelles il y a eu des discussions sont les baudroies, qui sont principalement ciblées par les professionnels rencontrés. De nombreuses réponses ont également été données pour le merlu, la cardine, l'églefin ou l'encornet.

2.1 Les Baudroies

Dix patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement des baudroies dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

L'ensemble de ces patrons indiquent que la baudroie est relativement passive devant le chalut car c'est un poisson qui est mauvais nageur de par sa morphologie. La baudroie décolle par l'action des maillettes voire du scoubidou, puis retombe dans le chalut. Certains professionnels indiquent que la baudroie suit le bateau en nageant vers l'entrée du chalut mais s'épuise très rapidement. D'autres patrons pensent qu'elle cherche à s'échapper sous les maillettes et le bourrelet mais la turbidité occasionnée l'effraie et elle reste donc au centre du couloir créé par les maillettes.

80% des professionnels ayant discuté sur la baudroie considèrent qu'elle est passive à l'intérieur du chalut, qu'une fois les ailes passées, elle va directement au fond dans le cul. Les deux autres professionnels estiment que la baudroie cherche à s'échapper dans le chalut. Pour l'un ça serait dans le ventre car une fois le gorget passé, elle n'a plus de place pour nager. Pour l'autre elle continue à nager dans la partie droite en suivant le navire pour tenter de remonter le tunnel du chalut.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

80% des professionnels ayant répondu sur la baudroie n'en retrouvent pas de maillées dans le chalut. Les 20% restant retrouvent quelques fois des baudroies maillées dans le ventre du chalut. Ces réponses ne dépendent pas du maillage utilisé par les professionnels (variant de 100 au 150 mm dans le ventre du chalut). Les mailles sont trop petites pour que les individus puissent passer la tête. Cependant, quelques baudroies maillées par la queue sont parfois retrouvées.

Les professionnels s'accordent à dire que lorsque la baudroie cherche à s'échapper, elle se dirige vers le bas ou sur les côtés du chalut (Tableau 3). En effet, certains affirment qu'il n'y a pas de perte de baudroies dans les captures avec des chaluts présentant des gorgets ouverts sur le dessus ou des chaluts sans grand dos.

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le bas	5
Nulle part	4
Vers les côtés	2

Tableau 3 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement de la baudroie

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Il ressort des différentes réponses qu'un grand maillage pourrait faciliter l'échappement des baudroies (Tableau 4). Cependant, la morphologie de ces espèces nécessiterait l'utilisation de très grandes mailles pour assurer leur échappement. Cette option n'est pas envisageable dans le contexte d'une pêche multispécifique car cela engendrerait la perte de toutes les autres espèces. Toutefois, un professionnel indique qu'il assure une sélectivité intra-

spécifique en permettant l'échappement des baudroies de petite taille grâce à un panneau maille carré de 100 mm de côté dans la partie ventrale du chalut.

La moitié des patrons note qu'une sélectivité interspécifique sur les baudroies pourrait avoir lieu en amont du chalut. En effet, l'utilisation de rockhoppers semble diminuer les captures de baudroies qui passent en dessous du bourrelet. La diminution de la longueur des maillettes est également citée comme une stratégie de limitation des captures de baudroies par un patron qui estime que c'est au moment du rabattement que ces espèces s'échapperaient le plus. L'utilisation de grandes ailes inférieures est également mentionnée comme favorisant la capture des baudroies.

Enfin, la vitesse de chalutage est indiquée comme ayant un effet sur la capturabilité des baudroies qui serait meilleure à petite vitesse (entre 2 et 3 nds).

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	7
Type de bourrelet	5
Forme de la maille	4
Vitesse de chalutage	3
Dispositif sélectif	2

Tableau 4 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement de la baudroie

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Les réponses apportées indiquent que lorsqu'il y a du mauvais temps, le chalut se décolle davantage du fond, permettant un échappement plus important des baudroies sous le bourrelet avant l'entrée dans le chalut. De plus, les ondulations du chalut provoquées par le mauvais temps entraînent une déformation des mailles qui s'ouvrent et qui favorisent l'échappement de manière générale.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Aucun	6
Mauvais temps	4
Sens de traîne/courant	1
Saison	1

Tableau 5 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement de la baudroie

Enfin, le mauvais temps ou le sens de traîne à contre courant diminue la vitesse de traîne et favorise également l'ouverture des mailles et donc l'échappement. D'autre part, de décembre à avril ces poissons bougent davantage, ils sont plus actifs dans leur déplacement. Ce paramètre pourrait influencer sur l'échappement de ces espèces.

Cependant, la majorité des réponses données (plus de 50%) n'établit pas de lien entre les paramètres environnementaux et l'échappement de la baudroie (Tableau 5).

2.2 Le Merlu

Neuf patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement du merlu dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

D'après les réponses qui ont été données, le merlu est un poisson qui est actif devant le chalut et qui va chercher à fuir. Plus de la moitié des réponses indique que le merlu nage en suivant le navire et finira par être capturé par fatigue. Les autres mentionnent un comportement de fuite de cette espèce qui va « piquer vers le haut » et passer par-dessus le chalut. Une dernière réponse déclare que le merlu cherche à fuir par les côtés.

Excepté une réponse qui mentionne que le merlu ne cherche pas à fuir dans le chalut et qu'il suit le flux d'eau jusqu'au cul de chalut, les autres patrons s'accordent sur le contraire. Ces derniers affirment qu'avant le gorget, le merlu cherche à s'enfuir vers le haut, il est retrouvé maillé dans le dos. Après le gorget, le merlu ne peut plus s'échapper car le maillage est trop petit, excepté à travers le panneau maille carrée « merlu » réglementaire (100 mm de côté de maille) par lequel il s'échappe et dans lequel il peut être retrouvé maillé.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

L'unanimité mentionne que le merlu s'échappe vers le haut (Tableau 6).

Il est retrouvé maillé dans le grand dos, le petit dos (maillages de 100 à 120 mm) et le panneau maille carrée réglementaire « merlu ». Trois professionnels indiquent retrouver du merlu maillé dans le cul de chalut également (maillages 70 et 100 mm) et deux professionnels relèvent du merlu maillé dans les ailes supérieures du chalut (maillages 150 et 160 mm).

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le haut	9

Tableau 6 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement du merlu.

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Le panneau à mailles carrées réglementaire « merlu » est le principal dispositif cité comme permettant une sélectivité intra-spécifique sur cette espèce. La forme des mailles carrées et son emplacement assure un échappement des petits individus. Un professionnel explique qu'à l'endroit où ce panneau à mailles carrées est placé (juste après le gorget), il y a un resserrement de la forme du chalut qui oblige les poissons à passer devant ce dispositif.

Un maillage en T90 en 100 mm est également nommé par 2 professionnels pour assurer une sélectivité intra-spécifique de l'espèce (Tableau 7). Il est évoqué qu'avec la mise en place d'un grand maillage en maille losange dans le dos et le gorget, il y a moins de merlus maillés à ces endroits. Un pêcheur indique que la filtration du chalut influence le maillage du merlu : moins il y a de turbulence dans le flux

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	8
Forme de la maille	8
Vitesse de chalutage	4
Dispositif sélectif	3
Rencontre avec le chalut	1
Lumière	1

d'eau, moins le poisson aura de contacts avec les mailles du chalut, donc il y aura moins d'échappement.

Tableau 7 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement du merlu.

Enfin, il est reconnu par de nombreux professionnels questionnés que plus le navire est lent, moins il pêche de merlus. En effet, plus le navire est lent, plus les mailles auront tendance à s'ouvrir et à laisser échapper les merlus

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Le mauvais temps est le premier facteur favorisant l'échappement (Tableau 8) pour 2 raisons : 1) le navire a une vitesse réduite et donc le merlu a tendance à s'échapper ; 2) le chalut ondule avec la houle, entraînant une ouverture des mailles et favorisant l'échappement.

Le sens de traîne contre le courant diminue également la vitesse du navire et favorise donc l'échappement du merlu.

D'autre part, l'explication au paramètre « saison » est qu'au printemps, les merlus étant plus petits, ils peuvent plus facilement passer à travers les mailles. Enfin, dans certaines zones de pêches plus vaseuses, lors des périodes à grands coefficients de marée, les eaux sont plus sales et agitées, alors le chalut a tendance à onduler, favorisant l'ouverture des mailles et l'échappement de merlus.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Mauvais temps	5
Sens de traîne/courant	3
Aucun	3
Coefficient de marée	1
Saison	1

Tableau 8 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement du merlu.

Cependant, trois réponses données n'établissent pas de lien entre les paramètres environnementaux et l'échappement du merlu.

2.3 La Cardine

Sept patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement de la cardine dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

L'ensemble des réponses indique que la cardine est un poisson actif qui cherche à fuir à l'entrée du chalut en nageant dans le sens du navire. La cardine est rabattue vers le centre et maintenue entre les maillettes dans un couloir de turbidité créée par le sédiment en suspension.

Une fois dans le chalut, le ressenti des patrons diverge. Un peu moins de la moitié pense que la cardine va directement dans le cul, alors qu'un peu plus de la moitié des professionnels considère qu'elle cherche à fuir soit tout le long du chalut, ou avant le gorget et dans le cul de chalut.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

L'ensemble des patrons s'accordent à dire que la cardine cherche à fuir vers le bas, et un peu plus de la moitié vers les côtés également (Tableau 9). Tous s'accordent sur le fait que la cardine se maille dans la partie inférieure des ailes (maillages de 120 à 160 mm). Elle est également retrouvée maillée dans le cul de chalut en 100 mm (70% des réponses). Seulement 2 réponses indiquent que la cardine peut être maillée un peu partout.

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le bas	5
Vers les côtés	3
Partout	2

Tableau 9 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement de la cardine

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

L'ensemble des patrons affirme que le maillage est un facteur technique favorisant l'échappement (Tableau 10). Certains (43%) indiquent qu'un grand maillage dans les ailes favorise l'échappement des cardines. L'absence d'ailes inférieures dans un chalut diminue également la pêche de cette espèce. De plus, un maillage de cul plus grand (passage du 80 au 100 mm) avantage l'échappement de la cardine.

L'utilisation du T90 (en 100 mm) dans le cul de chalut assure une sélectivité intra-spécifique de la cardine pour 57% des patrons ayant répondu sur cette espèce. L'utilisation d'un grand maillage dans le gorget ou d'une grille à lotte sont également mentionnées pour favoriser l'échappement des cardines.

Le type de bourrelet est également important pour 43% des pêcheurs. L'utilisation d'un carré franc laisse moins passer de cardines qu'avec des rockhoppers ou diabolos.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	7
Forme de la maille	4
Vitesse de chalutage	3
Type de bourrelet	3
Dispositif sélectif	1

Tableau 10 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement de la cardine

Le montage des mailles collées au bourrelet franc ou un montage irlandais, laisse également moins s'échapper la cardine.

Enfin une vitesse de chalutage rapide est plus favorable à la capture des cardines qui ont tendance à s'échapper lorsque le chalut est trop lent.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Les patrons ayant répondu que le mauvais temps favorise l'échappement de la cardine l'expliquent par la traction moins régulière du chalut qui ondule, ce qui favorise l'ouverture des mailles et donc l'échappement des petites cardines (Tableau 11). La houle peut également entraîner un moins bon contact du bourrelet avec le fond, avantageant l'échappement du poisson de toute taille.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Mauvais temps	4
Aucun	3
Sens de traîne/courant	1
Saison	1

Tableau 11: Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement de la cardine

La traîne du chalut face au courant est un facteur diminuant la vitesse du chalut et donc augmentant l'échappement de la cardine.

Enfin, une réponse indique que l'espèce est plus active de décembre à avril, pouvant influencer sur sa volonté à s'échapper.

Pour une petite moitié des patrons, les facteurs environnementaux affectent la capturabilité mais pas l'échappement.

2.4 L'Églefin

Sept patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement de l'églefin dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Excepté une, les réponses indiquent que l'églefin est une espèce active devant le chalut qui nage en suivant le bateau voire qui s'échappe en passant par-dessus la corde de dos du chalut.

Pour la majorité des patrons, l'églefin est actif et cherche à fuir avant le gorget puisque cette espèce est retrouvée maillé dans le dos.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Presque l'ensemble des réponses (86%) concordent sur un comportement de l'échappement de l'églefin vers le haut (Tableau 12). Cette espèce est retrouvée maillée dans les panneaux maille carrée dorsaux (« merlu » 100 mm de côté de maille ou « mer celtique » : 120 mm de côté de maille) pour plus de la moitié des réponses, mais aussi dans le grand et petit dos, dans le cul de chalut (maillage 100 mm) et dans les ailes supérieures (maillages 120 et 150 mm).

Une seule réponse indique un maillage dans les ailes inférieures.

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le haut	6
Nulle part	1

Tableau 12 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement de l'églefin

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Tous partagent que la taille du maillage est le principal facteur qui favorise l'échappement de l'églefin (Tableau 13). Plus le maillage est grand, notamment dans le dos, plus il y aura de l'échappement de petits églefins et moins de poissons maillés. De plus les dispositifs sélectifs tel le T90 en 100 mm dans le cul de chalut et le panneau maille carrée dorsaux sont identifiés comme assurant une sélectivité intra-spécifique sur cette espèce.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	7
Forme de la maille	6
Dispositif sélectif	3
Vitesse de chalutage	3
Lumière	1

Tableau 13 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement de l'églefin

La vitesse du chalut est également importante pour 3 professionnels ayant répondu sur cette espèce. Lorsque la vitesse est trop faible, l'églefin peut nager plus vite que le chalut et tenter de sortir ; ou les mailles du chalut sont plus ouvertes, aidant à l'échappement. Enfin, un patron indique qu'un axe de travail du chalut qui évite les turbulences permet une diminution des contacts du poisson avec les mailles et donc une diminution de l'échappement.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Le seul paramètre environnemental retenu par certains patrons comme favorisant l'échappement de l'églefin est le mauvais temps (Tableau 14). Le chalut ondule, entraînant une ouverture des mailles. Le mauvais temps est également à l'origine d'une vitesse plus réduite du chalutage et, par conséquent, une

tendance à l'échappement de l'églefin par remontée du poisson ou déformation des mailles. Trois réponses données n'établissent pas de lien entre les paramètres environnementaux et l'échappement de l'églefin.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Mauvais temps	4
Aucun	3

Tableau 14: Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement de l'églefin

2.5 L'Encornet

Six patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement de l'encornet dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

La moitié des patrons indique que l'encornet est une espèce active à l'entrée du chalut. Il va nager, est plutôt rapide et peureux. Un seul patron pense que l'encornet est directement pris dans le chalut sans chercher à fuir.

Une fois capturé, la moitié des patrons mentionne que l'encornet cherche à fuir sur toute la longueur du chalut.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

L'encornet cherche à s'échapper par le haut pour l'ensemble des patrons (Tableau 15). Il est retrouvé maillé dans le grand et petit dos, dans le panneau maille carrée « merlu », dans le cul (maillages 70 et 100 mm). Il a également une tendance à s'échapper par les côtés car il se retrouve aussi maillé dans les ailes et dans les faces latérales des chaluts 4 faces (chalut de maillage de cul 80 mm).

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le haut	6
Vers les côtés	1

Tableau 15 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement de l'encornet

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

La taille des mailles est importante pour la capture de l'encornet ainsi que leur forme (Tableau 16). Le T90 (en 80 ou 100 mm) et les mailles carrées sont cités comme évitant le maillage de l'encornet voire éladant toute capture de cette espèce.

L'échappement de l'encornet semble plus important dans les chaluts à 4 faces car cette espèce a tendance à piquer sur les côtés. Enfin, une vitesse de chalutage trop faible avantagerait un échappement de l'encornet pour 2 patrons rencontrés.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	6
Forme de la maille	6
Dispositif sélectif	2
Vitesse de chalutage	2

Tableau 16 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement de l'encornet

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

La majorité des patrons questionnés ne voit pas d'influence des paramètres environnementaux sur l'échappement des encornets (Tableau 17). Cependant un patron affirme qu'il n'y a pas de capture d'encornet avec le mauvais temps et qu'il y a plus d'échappement avec le courant dans le sens de traîne. Un autre patron mentionne que l'encornet est davantage retrouvé maillé le matin et le soir que le reste de la journée.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Aucun	4
Mauvais temps	1
Sens de traîne/courant	1
Jour/Nuit	1

Tableau 17: Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement de l'encornet

2.6 Le Merlan

Cinq patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement du merlan dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

L'ensemble des informations transmises révèle que le merlan est un poisson actif à l'entrée du chalut. Pour les professionnels, le merlan nage en suivant le bateau jusqu'à épuisement ou cherche à passer par-dessus la corde de dos. Le merlan reste actif dans le chalut, du moins avant le gorget.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Tous s'accordent à dire que le merlan s'échappe vers le haut (Tableau 18). Il est retrouvé maillé dans le grand et le petit dos, mais également les panneaux maille carrée dorsaux (« merlu » 100 mm de côté de maille ou « mer celtique » : 120 mm de côté de maille) par où il s'échappe, ainsi que dans le cul du chalut (maillage 100 mm).

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le haut	5

Tableau 18 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement du merlan

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

La forme des mailles et leurs tailles sont les principaux facteurs techniques influençant l'échappement du merlan (Tableau 19). Un patron indique qu'un grand maillage dans le dos et le gorget diminue le nombre de poissons maillés. De même, l'utilisation du T90 (100 mm) dans le cul du chalut ou les panneaux maille carrée dorsaux favorisent l'échappement des individus de petites tailles de cette espèce.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Forme de la maille	5
Maillage	4
Vitesse de chalutage	3
Dispositif sélectif	2
Lumière	1

Tableau 19 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement du merlan

La vitesse de chalutage est importante, car si elle est trop lente, le merlan aura davantage de réussite d'échappement en amont du chalut mais également par les mailles qui sont davantage ouverte par une vitesse réduite.

Enfin, un professionnel indique que limiter les turbulences du flux de l'eau dans le chalut, diminue les échappements de merlan.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Avec le mauvais temps, le chalut ondule, ce qui engendre une ouverture des mailles et facilite l'échappement du merlan. Le sens de traine contre le courant réduit la vitesse de chalutage donc avantage l'échappement. Pour 2 professionnels, il n'y a pas de facteurs environnementaux qui influencent l'échappement du merlan (Tableau 20).

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Mauvais temps	3
Aucun	2
Sens de traine/courant	1

Tableau 20 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement du merlan

2.7 Les Raies

Cinq patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement des raies dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Les raies sont identifiées comme des poissons qui cherchent à fuir à l'entrée du chalut. Elles sont perçues comme des espèces assez rapides nageant dans le sens du chalut. Un pêcheur indique qu'elles s'enfuient sur les côtés alors qu'un autre indique qu'elles restent entre les maillettes canalisées par le couloir de turbidité créée.

Les raies nageraient longtemps dans le chalut, elles peuvent être retrouvées dans la partie droite au moment du virage. Cependant, elles ne parviennent pas à s'échapper.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Seul 60% des patrons ayant répondu sur les raies indiquent qu'elles cherchent à fuir vers le bas (Tableau 21). Il est difficile de connaître leur comportement d'échappement car, de par leur morphologie, elles ne sont retrouvées maillées nulle part.

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le bas	3

Tableau 21 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement des raies

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

La forme et la taille des mailles ne sont pas des facteurs techniques faisant l'unanimité pour l'échappement des raies (Tableau 22). En effet, de par sa morphologie et la grande envergure des individus capturés, il semble difficile d'adapter un maillage permettant son échappement sans laisser passer les autres espèces capturées. Cependant, un pêcheur indique qu'en utilisant un maillage plus grand dans le gorget, il assure une sélectivité intra-spécifique en limitant les captures de petites raies.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Forme de la maille	2
Vitesse de chalutage	2
Type de bourrelet	2
Maillage	1
Dispositif sélectif	1

Tableau 22 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement des raies

Comme pour les autres espèces de poissons plats, pour 2 patrons, l'utilisation d'un rockhopper entraîne un échappement du poisson sous le bourrelet. La vitesse de traîne trop faible du navire est également indiquée comme favorisant un échappement plus important des raies car elles sont rapides dans leurs déplacements.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

40% des réponses indique que le mauvais temps fait décoller le chalut du fond, ce qui entraîne un échappement des raies par-dessous le bourrelet (Tableau 23). D'autre part, chaluter face au courant diminue la vitesse du navire par rapport au fond et donc du chalut, ce qui favorise l'échappement des raies qui fuient à l'entrée ou remontent le chalut.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Mauvais temps	2
Sens de traîne/courant	2
Aucun	2
Saison	1

Tableau 23 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement des raies

Enfin, pour 40% des pêcheurs ayant répondu sur ces espèces, il n'y a pas de facteurs environnementaux qui favorisent l'échappement des raies.

2.8 Le Rouget Barbet

Cinq patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement du rouget barbet dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Le rouget barbet est perçu comme une espèce nerveuse qui cherche à fuir dans tous les sens devant le chalut. Il reste très actif à l'intérieur du chalut, cherche à s'échapper tout au long de l'engin de pêche et remonte le flux d'eau. Lors du virage, une traction peu régulière du chalut ou une vitesse trop faible de virage avantage l'échappement de rouget par l'ouverture des mailles créée.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Le rouget barbet n'est pas retrouvé maillé car il est de petite taille. D'autre part, sa morphologie fait que si la tête passe la maille, le reste du corps suit. Cependant, 2 patrons indiquent qu'il est parfois maillé dans le cul de chalut ou juste en amont du cul de chalut (maillage de 70 mm). Pour les professionnels, le rouget barbet s'échappe du chalut dans toutes les directions (Tableau 24).

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Partout	5
Vers le bas	1

Tableau 24 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement du rouget barbet

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

La taille et la forme des mailles est le facteur principal laissant échapper le rouget barbet (Tableau 25). Avec du T90 et des mailles carrées, le rouget s'échappe fortement, tout comme à travers un grand maillage losange. Une vitesse du chalutage trop faible apparaît également comme un facteur favorisant l'échappement du rouget.

Le flux d'eau et les remous créés dans le chalut ont également été identifiés par un

professionnel comme avantageant le contact du rouget avec le chalut, donc son échappement par les mailles.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Forme de la maille	5
Maillage	5
Vitesse de chalutage	2
Dispositif sélectif	1

Tableau 25 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement du rouget barbet

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Le mauvais temps favorise l'échappement par l'ouverture des mailles créées par le mouvement du chalut qui ondule pour 80% des professionnels ayant répondu sur cette espèce (Tableau 26). Un patron indique qu'avec le mauvais temps, le rouget barbet meurt plus vite et donc qu'il y a moins d'échappement.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Mauvais temps	4
Sens de traîne/courant	2
Nature du fond	1

Tableau 26 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement du rouget barbet

Le sens de traîne est indiqué comme facteur influençant la fuite de cette espèce par deux patrons. L'un indique que face au courant le chalutage est ralenti permettant au rouget de remonter le chalut. L'autre précise qu'avec le courant dans le sens de chalutage, le chalut est moins tendu et que les mailles s'ouvrent avantageant l'échappement des rougets.

Enfin, le slalom effectué entre les roches sur les fonds durs entraîne des déformations du chalut et une ouverture des mailles.

2.9 La Sole

Cinq patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement de la sole dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Les réponses sur le comportement de la sole à l'entrée du chalut divergent. Deux patrons considèrent qu'elle est passive, deux autres n'en savent rien et le dernier affirme qu'elle est active et qu'elle cherche à fuir par les côtés.

De même, la moitié des réponses indique que la sole est plutôt passive dans le chalut et qu'elle s'active une fois qu'elle est dans le cul, où elle cherchera à s'échapper.

Les deux autres réponses sont différentes. Un pêcheur pense qu'elle est active car il la retrouve maillée dans le ventre, et un autre estime qu'elle cherche à s'échapper en nageant dans le sens du chalutage.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Si un patron ne s'est pas prononcé, les autres indiquent que la sole cherche à s'échapper vers le bas (Tableau 27). La sole est retrouvée maillée principalement dans le cul du chalut (maillages 80 et 100 mm) et parfois un peu dans le ventre.

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le bas	4

Tableau 27 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement de la sole

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

L'utilisation de maille en T90 dans le cul du chalut laisserait échapper des soles de taille commerciale. Avec l'utilisation d'un plus grand maillage losange, il y a également plus d'échappement. En passant du 70mm au 80 mm dans les culs de chalut, un patron constate plus de soles maillées. La vitesse de chalutage apparaît comme un facteur influençant l'échappement (Tableau 28) puisqu'une vitesse rapide aura tendance à diminuer l'ouverture des mailles losanges du cul de chalut.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	5
Forme de la maille	3
Vitesse de chalutage	3
Dispositif sélectif	1
Lumière	1

Tableau 28 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement de la sole

Enfin, un patron indique, qu'à la côte, en pleine lune (donc plus de lumière), il pêche plus de soles.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Bien que 2 patrons ne signalent pas de paramètres environnementaux qui favoriseraient l'échappement des soles, les 3 autres mentionnent qu'avec le mauvais temps, le chalut ondule, engendrant une déformation des mailles et donc un échappement plus important des soles (Tableau 29).

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Mauvais temps	3
Aucun	2

Tableau 29: Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement de la sole

2.10 Le Chinchard

Quatre patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement du chinchard dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Un seul des patrons commente le comportement du chinchard à l'entrée du chalut en indiquant qu'il cherche à s'échapper par les côtés et qu'il pique vers le haut (le voit au netsonde).

Deux professionnels mentionnent que, dans le chalut, le chinchard a un comportement de fuite en avant du gorget et au niveau du panneau maille carrée « merlu ». Une fois dans le cul du chalut, il est trop comprimé, ne peut plus nager et meurt rapidement.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Les patrons s'accordent sur le fait que le chinchard cherche à s'échapper vers le haut (Tableau 30). Il passe notamment au niveau du grand dos et du panneau maille carrée « merlu ». D'autre part, un patron indique que le chinchard s'échappe également par les ailes du chalut (maillage 160 mm). Il peut également parfois se retrouver maillé dans le cul de chalut (maillage 80 mm).

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Vers le haut	3
Partout	1

Tableau 30 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement du chinchard

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

La morphologie fine du chinchard favorise son échappement à travers les mailles. Toutes les réponses convergent sur l'amélioration de la sélectivité interspécifique envers le chinchard grâce à la maille carrée (Tableau 31). En effet, le panneau maille carrée « merlu » permet aux chinchards de toutes tailles de s'échapper. Son emplacement au niveau du gorget, là où le cylindre du chalut se resserre, oblige le poisson à passer devant et donc favorise la réussite du dispositif.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Dispositif sélectif	3
Forme de la maille	3
Maillage	3
Vitesse de chalutage	3
Rencontre avec le chalut	1

Tableau 31 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement du chinchard

Pour les navires qui travaillent au chalut pélagique, le panneau maille carrée permet l'échappement d'une grande partie des chinchards non désirés lorsqu'ils tombent sur une matre de ces derniers.

Enfin, le chinchard est une espèce qui nage vite, une vitesse de chalutage trop faible favorise également son échappement.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Les réponses données par les patrons concernant les paramètres environnementaux favorisant l'échappement du chinchard sont très variables et peuvent se contredire (Tableau 32). Un patron note qu'il ne capture pas de chinchard avec le mauvais temps, mais ne peut expliquer ce phénomène.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Sens de traine/courant	2
Mauvais temps	1
Aucun	1

Tableau 32 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement du chinchard

Deux patrons indiquent que le sens de traine par rapport au courant influe sur l'échappement du chinchard. Cependant, alors qu'un patron explique que le sens de traine face au courant diminue la vitesse du chalut entraînant l'ouverture des mailles et l'échappement du chinchard, un autre affirme que la vitesse de traine est plus faible mais que la vitesse du flux d'eau est plus importante dans le chalut et il est plus difficile pour le chinchard de nager à contre-courant, de remonter le chalut et de s'échapper. Un même paramètre peut donc avantager un comportement d'échappement (passage au travers des mailles) et désavantager un autre (remontée du chalut).

2.11 Le Maquereau

Trois patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement du maquereau dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Un seul patron mentionne le comportement du maquereau à l'entrée du chalut. Il pense que ce dernier nage en suivant le navire jusqu'à ce qu'il se fatigue. Une fois dans le chalut, il chercherait à s'échapper tout au long de l'engin de pêche.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Les réponses indiquent que le maquereau s'échappe au niveau du dos (Tableau 33). Il se retrouve principalement maillé dans le cul de chalut (maillages 70 et 80 mm). Il est également parfois maillé vers le haut et les côtés au niveau du gorget.

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Partout	2
Vers le haut	1

Tableau 33 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement du maquereau

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Comme le chinchard, de par sa forme longiligne, le maquereau passe facilement au travers les mailles (Tableau 34). Un patron indique qu'il a moins de maquereaux depuis qu'il a installé le panneau maille carrée « merlu ».

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	2
Forme de la maille	2
Dispositif sélectif	1
Vitesse de chalutage	1

Tableau 34 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement du maquereau

Une autre explique qu'une vitesse de chalutage trop lente peu également favoriser la remontée du maquereau dans l'engin, car c'est une espèce qui nage vite.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Le mauvais temps est le seul facteur mis en évidence par les professionnels comme pouvant favoriser l'échappement du maquereau (Tableau 35). Là encore, les mouvements ondulatoires du chalut engendrent une ouverture des mailles plus importante, avantageant l'échappement de l'espèce.

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Mauvais temps	2
Aucun	1

Tableau 35 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement du maquereau

2.12 La Seiche

Trois patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement de la seiche dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

La seiche est décrite comme une espèce qui ne fuit pas devant le chalut. Deux patrons indiquent que la seiche s'échappe en amont du cul de chalut. Lorsqu'elle se retrouve dans le cul, elle ne bouge plus. Le dernier considère que la seiche reste passive tout le long de l'engin de pêche.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

La seiche n'est principalement pas retrouvée maillée, lorsque c'est le cas, elle l'est dans le cul de chalut (70 mm). Le maillage de l'espèce dans le cul est principalement dû à la pression exercée par l'ensemble des captures (Tableau 36). La seiche ne s'échappe pas vraiment, car elle n'est pas active mais plutôt « chamallow », il est facile de la pêcher car elle ne bouge pas trop.

Direction de l'échappement	Nombre de réponses
Nulle part	1
Partout	1

Tableau 36 : Réponses des professionnels sur la direction d'échappement de la seiche

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

La forme et la taille du maillage sont les facteurs techniques cités qui permettent l'échappement de la seiche (Tableau 37). L'augmentation du maillage et l'utilisation du T90 entraîne une sélectivité sur l'ensemble de cette espèce.

Facteurs techniques favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Maillage	2
Forme de la maille	1

Tableau 37 : Réponses des professionnels sur les facteurs techniques favorisant l'échappement de la seiche

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Alors que deux professionnels ne notent pas de facteurs environnementaux favorisant l'échappement des seiches, le troisième précise que les mouvements d'« accordéon » que fait le chalut par mauvais temps ouvrent davantage les mailles de l'engin de pêche et favorise l'échappement de la seiche (Tableau 38).

Paramètres environnementaux favorisant l'échappement	Nombre de réponses
Aucun	2
Mauvais temps	1

Tableau 38 : Réponses des professionnels sur les paramètres environnementaux favorisant l'échappement de la seiche

2.13 Le Sanglier

Deux patrons pêcheurs ont apporté des éléments sur le comportement du sanglier dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Cette espèce est perçue comme très active avec un comportement qui tente de s'échapper à l'entrée du chalut. Cependant leur nombre très important au moment de la prise entraîne des captures non désirées.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Le sanglier est principalement maillé au niveau du dos du chalut, mais également au niveau des ailes supérieures et dans le cul de chalut (100 mm). Cependant, ils sont tellement nombreux qu'il peut y en avoir de maillés partout. Un patron indique que lorsque le chalut est plein de sangliers, il décolle par le cul car les poissons cherchent à s'échapper vers le haut.

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Les deux patrons affirment que l'utilisation du T90 en 100 mm dans le cul de chalut est la solution pour limiter très fortement les captures de sanglier. Cette forme de maille laisse échapper cette espèce, toutes tailles confondues.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Les professionnels ne se sont pas prononcés sur ce sujet.

2.14 Le Bar

Un seul patron pêcheur a apporté des éléments sur le comportement du bar dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Le bar est une espèce qui nage vite et s'échappe vite. Devant le chalut, le pêcheur indique qu'il cherche à fuir vers les côtés et le haut. Dans le chalut, il semble vouloir s'échapper dans toutes les parties du chalut mais principalement vers le haut. Lors du virage, si la vitesse n'est pas assez rapide, le bar nage, remonte dans le chalut et s'échappe.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Le bar a tendance à vouloir s'échapper vers le haut, il est retrouvé maillé dans le panneau maille carré « merlu » et dans le grand dos.

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

La forme des mailles peut influencer sur l'échappement du bar, puisque la maille carrée semble faciliter son échappement.

De plus, une vitesse trop faible avantage la fuite du bar qui arrive à remonter le chalut.

Enfin, avant sa capture, le bar peut parvenir à passer au-dessus des chaluts qui présentent une petite ouverture verticale.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

D'après le professionnel, quand il y a de la houle, le bar se tapit dans le fond, ce qui avantage leur capture au chalut de fond. Le sens de traine par rapport au courant peut affecter la capture du bar qui réussirait à s'enfuir si la vitesse de traine est trop faible.

2.15 Les Dorades

Un seul patron pêcheur a apporté des éléments sur le comportement des dorades dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Le pêcheur indique que les dorades suivent le chef de la matte ; si ce dernier rentre dans le chalut, toute la matte rentre, sinon il n'en pêchera pas.

Dans le chalut, les dorades cherchent à fuir dans gorget jusqu'au cul.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Les dorades ont un comportement d'échappement vers le haut. Il ne les retrouve pas maillées car celles qu'il capture sont de grande taille. Cependant, quand elles sont petites, il en retrouve certaines maillées dans le cul (maillage 70 mm).

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Pour le professionnel, compte tenu de la morphologie des dorades, la forme des mailles ne joue pas sur l'échappement. Cependant, l'utilisation d'un grand maillage peut permettre l'échappement des plus petits individus.

Une fois pêchées, les dorades ont du mal à s'échapper. Ce sont des poissons puissants mais à la vue de leur morphologie, elles n'arrivent pas à sortir.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Le professionnel ne s'est pas prononcé sur ce sujet.

2.16 L'Encornet Rouge

Un seul patron pêcheur a apporté des éléments sur le comportement de l'encornet rouge dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Le pêcheur indique qu'à l'entrée du chalut, les encornets rouges nagent en banc. Ils ne s'échappent pas avant d'entrer dans le chalut. Une fois dans le chalut, l'encornet rouge cherche à s'échapper au niveau du gorget et de la partie droite (100 mm).

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Le professionnel indique que l'encornet rouge est maillé partout juste en amont du cul de chalut (maillage 100 mm).

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Le T90 ainsi que l'augmentation de la taille du maillage favorise l'échappement de l'encornet rouge.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Comme pour les autres espèces, le mauvais temps et la houle occasionnée provoque des ondulations du chalut à l'origine d'un échappement plus important des encornets rouges.

2.17 Le Lieu Jaune

Un seul patron pêcheur a apporté des éléments sur le comportement du lieu jaune dans un chalut.

❖ Comportement de l'espèce

Le lieu jaune est décrit comme actif à l'entrée du chalut avec une recherche de fuite vers le haut. Dans le chalut, ce dernier reste actif même pendant la période du virage s'il est encore vivant.

❖ Direction de l'échappement & Maillage de l'espèce

Le lieu jaune est retrouvé maillé dans le grand dos jusqu'au panneau maille carrée « mer celtique ».

❖ Facteurs techniques favorisant l'échappement

Le patron indique que la maille carrée permet l'échappement des lieux jaunes de petites tailles et assure une sélectivité intra-spécifique. Cependant, il indique que le maillage en T90 dans le cul en 80 mm ne permet pas au lieu jaune de s'échapper car ils sont trop gros.

❖ Paramètres environnementaux favorisant l'échappement

Le professionnel ne s'est pas prononcé sur ce sujet.

3 Conclusion et perspectives

Les facteurs favorisant l'échappement d'un poisson hors d'un chalut sont divers et varient avec la morphologie et le comportement de chaque espèce. A travers les réponses données par les 14 patrons pêcheurs de chalutiers de fond rencontrés, certaines tendances apparaissent.

Un cul de chalut en maillage T90 semble améliorer fortement la sélectivité intra-spécifique de certaines espèces à morphologie ronde comme l'églefin, mais aussi la sélectivité interspécifique sur des espèces indésirées comme le sanglier. L'utilisation de panneau en mailles carrées en 100 mm ou 120 mm de côté et placé sur la partie dorsale du chalut assure également une sélectivité intra-spécifique sur des espèces de gadidés qui ont des comportements de fuite vers le haut comme le merlu et l'églefin, en favorisant l'échappement des petits individus. Ce dispositif permet aussi le passage de poissons pélagiques comme le maquereau ou le chinchard qui présentent un comportement de fuite et une morphologie ronde et longiligne relativement similaires. A noter que l'emplacement du dispositif dans des zones où le chalut se resserre (panneau à mailles carrées) ou de concentration du poisson (cul de chalut) favorise son efficacité puisque cela assure une plus forte probabilité de contact entre les poissons et le dispositif.

Une augmentation de la taille des mailles peut permettre l'échappement de certains individus qui se maillaient avec un plus petit maillage (ou augmenter le maillage de certains individus qui n'arrivaient pas à se mailler). Cependant, pour certaines espèces de grande envergure telles que les baudroies ou les raies, l'augmentation de la taille des mailles ne semble pas être une solution pour assurer une sélectivité sur ces espèces.

Pour ces poissons benthiques et de forme plate (baudroies, raies, cardine), le type de bourrelet utilisé influe sur leur capture à l'entrée du chalut. L'utilisation de rokhoppers ou diabolos avantage le passage de ces poissons sous le bourrelet. L'utilisation d'un carrée franc est mieux adapté à la pêche de ces espèces. De plus, alors que les raies et baudroies ne sont que très rarement maillées dans le chalut, la cardine est quant à elle retrouvée maillée dans la partie inférieure des ailes en grande quantité.

D'autre part, en plus des caractéristiques techniques de l'engin, la manière de l'utiliser peut avantager la fuite des espèces. En effet, une vitesse de chalutage faible va favoriser l'échappement de certaines espèces rapides et bonnes nageuses qui vont réussir à fuir en amont du chalut ou en nageant à contre flux dans le chalut et en le remontant (églefin, raies, maquereau, chinchard, etc). De même, la toile du chalut est moins tendue lorsqu'il est remorqué à faible vitesse, les mailles sont moins serrées ce qui avantager le passage des poissons au travers (rouget, maquereau, églefin, etc.).

De plus, certains professionnels évoquent la nécessité d'avoir un flux d'eau régulier dans le chalut afin d'éviter les turbulences qui ont tendance à mettre en contact les poissons avec les mailles du chalut.

Enfin, les pêcheurs rencontrés ne notent pas souvent de facteurs environnementaux qui aident à l'échappement des individus. Cependant, lorsqu'il y a du mauvais temps, ils

estiment qu'il y a moins de capture car le chalut ondule provoquant l'ouverture des mailles, la vitesse de traîne est réduite et la turbulence provoquée dans le flux d'eau est accentuée. Avec le mauvais temps, le chalut décolle, le contact du bourrelet avec les fonds est moins bon, diminuant également la capture de certaines espèces benthiques.

Les espèces ont donc des morphologies et des comportements différents qu'il faut pouvoir appréhender au mieux pour adapter la forme et la localisation des dispositifs. Les informations qualitatives obtenues auprès de ces professionnels peuvent être utilisées pour valider qualitativement les résultats numériques obtenus par ailleurs dans le projet « Fusion » et permettre d'orienter les futurs travaux à engager.

Remerciements

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du programme FUSION, porté par l'IFREMER en partenariat avec le COREPEM, le MNHN et l'AGLIA. Ce programme bénéficie du soutien financier de France Filière Pêche et de la Direction des Pêches Maritimes et de l'Aquaculture. Merci aux patrons pêcheurs qui ont répondu au questionnaire pour leur collaboration. Merci également à l'ensemble des personnes et des structures ayant participé à la réflexion et à la mise en place de ce questionnaire.

Table des figures et tableaux

FIGURE 1 : REPARTITION DES PATRONS RENCONTRES PAR QUARTIER D'IMMATRICULATION	5
FIGURE 2 : ZONE DE TRAVAIL DES CHALUTIERS DES PATRONS RENCONTRES.	5
TABLEAU 1 : ESPECES CITEES COMME ETANT CIBLEES PAR LES PATRONS RENCONTRES.	5
TABLEAU 2 : OCCURRENCE DE QUESTIONNAIRES REALISES PAR ESPECES	6
TABLEAU 3 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DE LA BAUDROIE	7
TABLEAU 4 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE LA BAUDROIE	8
TABLEAU 5 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE LA BAUDROIE	8
TABLEAU 6 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DU MERLU.....	9
TABLEAU 7 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU MERLU.	10
TABLEAU 8 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU MERLU.....	10
TABLEAU 9 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DE LA CARDINE	11
TABLEAU 10 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE LA CARDINE.....	11
TABLEAU 11 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE LA CARDINE	12
TABLEAU 12 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DE L'EGLEFIN	13
TABLEAU 13 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE L'EGLEFIN	13
TABLEAU 14 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE L'EGLEFIN	14
TABLEAU 15 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DE L'ENCORNET	15
TABLEAU 16 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE L'ENCORNET	15
TABLEAU 17 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE L'ENCORNET	16
TABLEAU 18 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DU MERLAN.....	17
TABLEAU 19 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU MERLAN	17
TABLEAU 20 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU MERLAN	18
TABLEAU 21 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DES RAIES.....	19
TABLEAU 22 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DES RAIES	19
TABLEAU 23 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DES RAIES.....	20
TABLEAU 24 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DU ROUGET BARBET	21
TABLEAU 25 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU ROUGET BARBET..	21
TABLEAU 26 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU ROUGET BARBET.....	22
TABLEAU 27 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DE LA SOLE	23
TABLEAU 28 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE LA SOLE.....	23
TABLEAU 29 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE LA SOLE	24
TABLEAU 30 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DU CHINCHARD	25
TABLEAU 31 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU CHINCHARD	25
TABLEAU 32 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU CHINCHARD	26
TABLEAU 33 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DU MAQUEREAU.....	27
TABLEAU 34 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU MAQUEREAU	27
TABLEAU 35 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DU MAQUEREAU	27
TABLEAU 36 : REPONSES DES PROFESSIONNELS SUR LA DIRECTION D'ÉCHAPPEMENT DE LA SEICHE.....	28

TABLEAU 37 : REPNSES DES PROFESSIONNELS SUR LES FACTEURS TECHNIQUES FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE LA SEICHE	28
TABLEAU 38 : REPNSES DES PROFESSIONNELS SUR LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX FAVORISANT L'ÉCHAPPEMENT DE LA SEICHE	28

Annexe : Questionnaire

<p style="text-align: center;">Questionnaire FUSION Mieux Connaître le comportement des poissons dans le chalut</p>
--

Nom du Navire :

Nom du Patron :

Zones Fréquentées :

- Golfe de Gascogne
- Mer Celtique
- Manche

Espèces cible :

Espèces cible :

Espèces cible :

Type de chalut :

- Chalut simple
- Chaluts jumeaux

Espèce :

1/Selon vous, quel est le comportement de l'espèce

	Actif (Nage dans le sens du chalut)	Actif (Cherche à fuir)	Passif	Autres	Commentaires
Devant le chalut					
Avant le gorget					
Au niveau du gorget					
Dans la Partie droite					
Dans le cul du chalut					
Lors du virage					

2/D'après vous comment l'espèce cherche-t-elle à s'échapper ?

- Vers le Haut
- Vers le bas
- Vers les côtés
- Partout
- Nulle Part
- Autres :

3/Observez-vous des poissons maillés ? Si oui dans quelle partie du chalut ?

4/ D'après vous quels sont les facteurs qui permettent de favoriser l'échappement de cette espèce ?

- Lumière
- Rencontre avec le chalut
- Autre stimuli
- Dispositif sélectif Si oui, lequel : _____
- Forme de mailles (mailles carrées, T90,...)
- Maillage
- Type de bourrelets
- Vitesse de chalutage
- Autres :

Quelles sont les observations qui vous permettent d'acquérir cette connaissance ?

Commentaire général sur le comportement de l'espèce

Selon vous, pour une même espèce, existe-t-il des différences de comportement selon les zones (Mer Celtique, Manche, golfe de Gascogne,...) ?

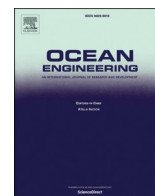
D'après vous, quels sont les paramètres technologiques qui favorisent l'échappement ou sur le comportement du poisson (nb de faces, probabilité de contacts, ouverture verticale..) ?

D'après vous, est ce que les paramètres environnementaux peuvent influencer le comportement du poisson ?

Conditions	Observations/commentaires
Saison	
« Mauvais temps »	
Coefficient de marée	
Nature du fond	
Nuit/jour	
Sens de traîne/courant	



8 Annexe 3 : publication des travaux sur les propriétés des filets et leur simulation



Development of a model for flexural rigidity of fishing net with a spring mass approach and its inverse identification by metaheuristic parametric optimization

B. Vincent^{a,*}, J. Simon^a, N. Di Cesare^b

^a IFREMER-STH/LTBH, Station de Lorient, 8 rue François Toullec, 56100, Lorient, France

^b Univ. Bretagne-Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100, Lorient, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Fishing net mechanics
Twine flexural rigidity
Numerical simulation
Selectivity
Fishing

ABSTRACT

The assessment of mesh resistance to opening is a key factor when coming to fishing gear design to study or optimize the fishing selectivity process. Different authors proposed methodologies to achieve twine flexural rigidity identification and mesh opening angle at rest. Their experimental protocols could rely on complex installations and instrumentation, and identification needs dedicated models or software with possible important set up time. Sometimes, different flexural rigidity and rest angle values for a given netting type were proposed depending on identification or experimental conditions, leading to difficulties to choose a value for implementation in netting structures simulation software. The new methodology proposed in this article is based on a simplified experimental protocol taking plasticity into account and an identification method derived from an end user dedicated software, to determine mechanical and dimensional characteristics of common netting materials. Identified flexural rigidity and rest angle values fall inside the interval provided by authors using similar methods. Identified parameters have been used to predict the geometry of two T90 netting cylinders with errors lower than 3%.

1. Introduction

The reform of the European Common Fisheries Policy (CFP) of 2013 has increased the pressure on fishers, compelling them to reduce the catch of untargeted species. A technical way to avoid fishing untargeted species is to improve the selection capability of the fishing gear. For fishing gear like trawls made of nettings, mechanical properties of braided twines have a strong influence on net meshes opening (Herrmann et al. (2013)) and consequently on the selectivity properties, especially in the terminal part of the fishing gear: the codend is pulled into a bulb-shape as it is loaded by fish, which provides more open meshes in the front part of the bulb which enables the fish to escape (Robertson and Stewart (1988)).

The mesh opening mechanism is complex and involves the twine bending stiffness. A direct measurement of bending stiffness is not possible and needs an inverse identification process where a set of mesh characteristics, including bending stiffness, is adjusted till the model best reproduces a series of experiments. Experimental protocols and numerical modeling are involved in this process.

Several experimental protocols have been tested by different authors to assess the value of the bending stiffness of twine composing fishing nets. Sala et al. (2007) developed a complex and expensive experimental system to measure the forces needed to uniformly deform a sample of netting. Bending stiffness could be deduced using the beam theory. Priour and Cognard (2011) proposed to measure the deformation of a vertical netting sample under different loads and the flexion of a netting sample as a cantilever under its own weight. De La Prada and González (2016) proposed a way to establish a relation between the height of a netting sample and the force applied in its lower part in a vertically suspended and uniaxial configuration using a tensile test bench. Morvan et al. (2016) used a similar configuration where each lower node of the netting sample had its own weight to simulate a force, with no need of a tensile test bench. The sample heights were measured for the different loads but the sample width was not considered to identify the bending stiffness.

De La Prada and González (2016) state that axial rigidity (EA) for common netting twines ranges between 500N and 3000N and that its effect on netting deformation is negligible compared to flexural

* Corresponding author.

E-mail address: benoit.vincent@ifremer.fr (B. Vincent).

deformations, except for deformations that hardly happen in real marine applications. In parallel, the theory used by O'Neill (2002) does not involve axial elasticity and value of axial rigidity are not provided by Morvan et al. (2016).

Mechanical and geometrical properties of netting samples can be identified by the optimization of a set of parameters used in a physical oriented approach model. Priour (2001); Priour and Cognard (2011) modelled the flexural rigidity with a torque located at the physical knot supposing that the twines remain straight. De La Prada and González (2016) used two different approaches: (1) asymptotic development of a model of the twine as a bi-dimensional double-clamped beam developed by O'Neill. This model was based on the beam bending equations under several hypothesis: (i) the bending moment is proportional to the twine curvature and (ii) no axial elasticity. (2) A finite element model allows the assessment of the force – displacement response, then fitting techniques have been used to set bi-dimensional dimensionless models that compare accurately (“spline” model) and reasonably accurately (polynomial model, 5%–10% of deviation), with the exact solution previously given by O'Neil. These models express the reaction force as an explicit function of the twine deformation and can be used to solve large deformations of the net. These models assume uniform deformations and are not applicable to 3 dimensional problems. A finite element model in Abaqus for a small number of meshes have been developed by Morvan et al. Mesh sides are assumed to behave like Timoshenko beams, taking into account the mesh resistance to the net's opening, allowing the simulation of non-uniform deformation. Again, the optimization does not consider the relation between the sample width and the load. The length of the physical knots is not considered. These models are specifically designed to identify netting mechanical properties. Thus, the identification of netting mechanical parameters by the final user of the netting modelling software can be difficult. In this context, this work proposes to apply identification results to larger structures simulation, by comparing the numerical and experimental results.

Nettings used in fishing gear can be loaded with high forces able to generate permanent plastic deformations in twines and knots (De La Prada (2014)). Plasticity has been taken into consideration in De La Prada and Gonzalez (2015) in a single load/unload cycle. For each load the operator waited until the sample length becomes stable. Moreover, the maximum force (leading to stretch the sample to 80% of its maximum stretched length) was applied during 1 h after the last load increment and before the first unload increment. The relations between sample height and forces for the load and the unload phases were then analyzed separately. Plasticity was not taken into consideration by Morvan et al. (2016).

In the present work, we attempt to establish a practical methodology to estimate the mechanical and geometrical properties of netting materials. The proposed method is original as it is based on the use of artificially intelligent algorithms applied to the algorithm used in netting structure simulation in marine environment. This netting structure simulation algorithm is implemented in a widely used commercial software (DynamiT) specialized in trawl simulation presented by Nguyen et al. (2015); Nguyen and Winger (2016) and thus does not rely on any other theory nor software. Moreover, it is proposed to overcome some of the drawbacks of previous methods: (1) the present method considers eventual flexural forces and deformations normal to the two normalized netting directions N and T (Fig. 1), (2) the simple experimental protocol proposed by De La Prada and Gonzalez (2015) was slightly simplified to enable the end users to identify by themselves the properties of nettings without the need of laboratory facilities, (3) the plasticity is taken into account in a more realistic way, (4) identified parameters for some common nettings are applied to larger netting structures simulation and compared to experimental results. Finally, an original metaheuristic optimization algorithm based on artificial intelligence is used to identify the constitutive parameters of the fishing net model.

2. Fishing net mechanical modelling

2.1. Modelling of meshes

In the present work, netting is modelled by using the work of Bessonneau and Marichal (1998) and Le Bris and Marichal (1999) where an axial elasticity model has been added for the present work. Net meshes are considered as twines and nodes. Each twine, or mesh side, can be split into two or more rigid bars to model its suppleness. Thus, a mesh is broken down in a set of mass nodes linked by rigid bars supporting a tension. Additional forces are added to model gravity forces or any external force (Fig. 1).

2.2. Dynamical equilibrium of netting elements

Let's consider a system constituted by N nodes and M rigid bars. The mass of a bar is concentrated at each end nodes. Forces applied on bars (weights and internal forces for instance) are located at end nodes. Bessonneau and Marichal proposed a method to solve the dynamic equilibrium of this system using the second law of Newton applied to each node in a Galilean frame. If we consider the bar j linked to the node i , then half the mass of the bar j and half the external forces applied on bar j , are assumed to be applied directly on node i . Thus N equations can be written as follows:

$$m_i \vec{\gamma}_i = \sum_{\text{neighbour bars } j} (\vec{T}_{ij} + \vec{H}_{ij}) \quad i \in [1, N] \quad [1]$$

where m_i is the pseudo mass of node i taking into account half masses of bars j , $\vec{\gamma}_i$ is its acceleration, \vec{T}_{ij} is the tension applied by neighbor bars j on node i and \vec{H}_{ij} is half an external force applied to bar j .

The so called length condition is imposed by solving the following equation where ℓ_{kl} is the length of the bar limited by nodes k and l :

$$\ell_{kl}^2 = (\vec{X}_k - \vec{X}_l)^2 \quad [2]$$

where \vec{X}_k is the position of node k in a Galilean frame.

Using a simple semi implicit first order Euler scheme for velocity to express the velocity of node k at time $n+1$ using the know time step h , it follows:

$$h \vec{V}_k^{n+1} = \vec{X}_k^{n+1} - \vec{X}_k^n \quad [3]$$

We get an explicit expression for velocity from eq. [2]:

$$(\vec{V}_k^{n+1} - \vec{V}_l^{n+1})(\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n) = \frac{1}{2h} \ell_{kl}^2 - \frac{1}{2h} (\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n)^2 \quad [4]$$

Using again an Euler scheme for acceleration in eq. [1] and substituting velocities in eq. [4] we get a linear equation for each structure bar, where bar tensions are the unknown variables to be solved

$$\begin{aligned} & (\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n)^2 + h^2 (\vec{V}_k^n - \vec{V}_l^n)^2 + 2h (\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n) (\vec{V}_k^n - \vec{V}_l^n) \\ & + 2h^2 (\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n) \left(\frac{1}{M_k} \left\{ \sum_{p \in \text{NB}(k)} T_{jp}^{n+1} \frac{\vec{X}_p^n - \vec{X}_k^n}{\ell_{jp}} + \vec{H}_{kp}^n \right\} \right) \\ & + 2h^2 (\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n) \left(\frac{1}{M_l} \left\{ \sum_{p \in \text{NB}(l)} T_{lp}^{n+1} \frac{\vec{X}_p^n - \vec{X}_l^n}{\ell_{lp}} + \vec{H}_{lp}^n \right\} \right) = \ell_{kl}^2 \quad [5] \end{aligned}$$

where $\text{NB}(k)$ is the set of neighbor bars of the node k , ℓ_{kp} is the length of bar B_{kp} .

The matrix equation for T is symmetrical and is efficiently solved with Gauss method for low rank matrix (lower than 1000 unknown variables) and by considering conjugate gradient methods for higher ranks.

Bessonneau and Marichal and later LeBris have used the following algorithm to solve this system of stiff equations in the time domain: from

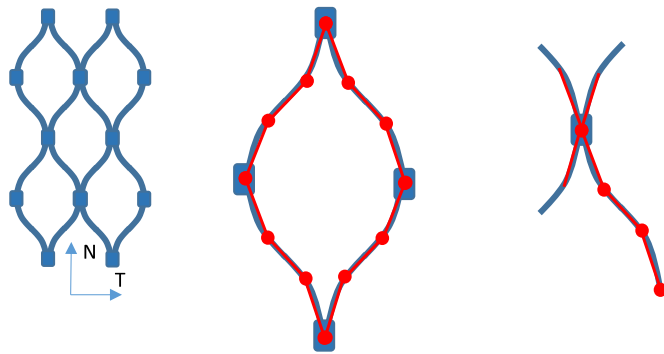


Fig. 1. A net is split into elementary meshes which are split again in a set of rigid bars. Normalized netting directions N and T denote the knot direction (Normal) and the Transverse direction.

initial positions and velocities verifying the length conditions, external forces are calculated, tensions are solved from the linear equation [5]. Acceleration, velocities and positions are calculated at the time step $n+1$. This iteration is repeated until a convergence criterion is reached. This algorithm has been used in this work to solve internal forces and positions of the netting twine and nodes.

2.3. External forces

The application considered in this study only requires weight forces due to the material specific weight and punctual weights applied in some structure nodes. Damping force due to hydrodynamic load is not considered.

2.3.1. wt

Twine weight forming mesh bars and netting knots is applied to calculation nodes. Weights attached to the lower part of the netting model are applied to the lower nodes of the model.

2.4. Internal forces

2.4.1. Axial elasticity

In order to have a more realistic modeling and to increase the diagonal dominance of the matrix equation, a linear axial elasticity term

has been added in equation [2].

$$\ell_{kl} = \ell_{0kl}(1 + k_{kl}T_{kl}) \quad [6]$$

Where k_{kl} is the inverse of the bar axial stiffness and the length of bar free of load ℓ_{0kl} . These length conditions are linearized, assuming $kT \ll 1$, which means that relative axial elongation of a mesh side is low, which is verified in most cases of practical use of fishing nets application.

Length condition at time $n+1$ becomes:

$$\ell_{kl}^{n+1} = \ell_{0kl}^2(1 + 2k_{kl}T_{kl}^{n+1}) = (\vec{X}_k^{n+1} - \vec{X}_l^{n+1})^2 \quad [2b]$$

We get a new explicit expression for velocity from eq. [6]

$$(\vec{V}_k^{n+1} - \vec{V}_l^{n+1})(\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n) = \frac{1}{2h}(1 + 2k_{kl}T_{kl}^{n+1})\ell_{kl0}^2 - \frac{1}{2h}(\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n)^2 \quad [8]$$

This leads to a new set of matrix equations

$$\begin{aligned} &(\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n)^2 + h^2(\vec{V}_k^n - \vec{V}_l^n)^2 + 2h(\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n)(\vec{V}_k^n - \vec{V}_l^n) \\ &+ 2h^2(\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n) \left(\frac{1}{M_k} \left\{ \sum_{p \in NB(k)} T_{jp}^{n+1} \frac{\vec{X}_p^n - \vec{X}_k^n}{\ell_{jp}} + \vec{H}_{kp}^n \right\} \right) \\ &+ 2h^2(\vec{X}_k^n - \vec{X}_l^n) \left(\frac{1}{M_l} \left\{ \sum_{p \in NB(l)} T_{lp}^{n+1} \frac{\vec{X}_p^n - \vec{X}_l^n}{\ell_{lp}} + \vec{H}_{lp}^n \right\} \right) = (1 + 2k_{kl}T_{kl}^{n+1}) \ell_{kl}^2 \end{aligned} \quad [9]$$

where the dominance of the diagonal is increased with elasticity terms making it easier to solve.

Coefficient k can be elongation-dependent depending on the material constituting the netting. Other authors chose to neglect the axial rigidity or concluded that this parameter has negligible effects for standard marine applications. To feed the proposed model with this parameter, the knot deformation when loading a mesh side is then taken into account. The assumption is made that the knot behavior is not depending on the twine. Wanchana et al. (2002) has established a linear load–elongation curve resulting from breaking strength tests by considering the “English knot” for PE twines. The relative knot strength is 65% of the tensile breaking strength and the elongation at breaking is 22.8%. A first approximation of the k coefficient in equation [2b] is thus $k = \frac{0.228}{0.65Bs}$ where Bs is the tensile breaking strength in Newton. The breaking load of the 3 mm twine used in this work is 120 kgw, which leads to $1/k = 3356$ N. The breaking load of 4 mm PE twine is 180 kgw, which leads to $1/k = 5034$ N.

2.4.2. Flexural forces

The connected structure made of bars as described above is not a representative model of an actual net as it does not take into account the twines flexural resistance. According to elementary beam theory, the relationship between the applied bending moment M and the resulting curvature of the center line of the beam is given by:

$$-\frac{EI}{\rho} = M$$

where ρ is the radius of curvature, E is the elastic modulus, I is the inertia of the beam’s section. The expression of the bending moment is valid under the assumption of a symmetrical beam and if its transverse sections remain normal to the bended centerline. Thus, the bending moment is assumed to be proportional to the curvature of the twine at each location of the twine, the bending stiffness is EI also known as the flexural rigidity. For present work and like authors cited in this work, the same assumptions are made, leading to good results.

Flexural rigidity of twines is taken into account to model its resistance to bending in these two situations: (1) to model the suppleness of the twine and (2) when the twine is embedded into a netting node.

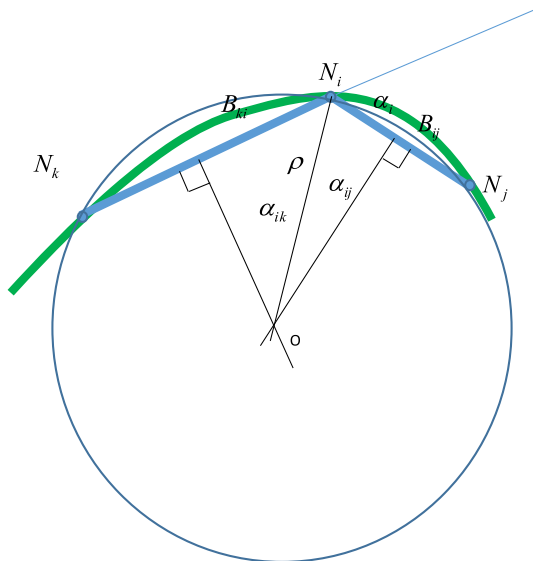


Fig. 2. Discretization of 2 adjacent bars (blue) to model the bending moment of a twine (green curve). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

2.4.2.1. *Curvature radius to model the suppleness of a twine.* In Fig. 2, the green line is supposed to be a bended netting twine. The bar B_{ki} defined by its two ends nodes $\overline{N_k N_i}$ and the bar B_{ij} defined by $\overline{N_i N_j}$ are two adjacent bars discretizing the bended twine element.

The rotation angle of the discrete bar $\overline{N_i N_j}$ from its non-bended position is α_i . The radius of curvature ρ is assumed to be the radius of the osculating circle to the local twine shape. The circle is the circumcircle to the triangle $(N_i N_j N_k)$. Thus its center is located at the intersection of the bisectors to $(N_i N_j)$ and $(N_j N_k)$. Consequently, α_i is also the angle between the bisectors. Thus, it follows:

$$\sin(\alpha_{ik}) = \frac{\ell_{ij}}{2\rho} \text{ and } \sin(\alpha_{ij}) = \frac{\ell_{jk}}{2\rho}$$

By using $\alpha_i = \alpha_{ik} + \alpha_{ij}$ and the common relation

$$\sin(\alpha_1) + \sin(\alpha_2) = 2 \sin\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right)$$

$$\text{it comes } \rho = \frac{\ell_{ij} + \ell_{jk}}{4 \sin\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)} \text{ and } M_i = -EI \frac{4 \sin\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)}{\ell_{ij} + \ell_{jk}}$$

A general expression using triangle points co-ordinates to calculate the radius of the circumcircle of a triangle could also be used.

2.4.2.2. *Curvature radius to model a twine embedded in a netting knot.*

The observation of a piece of netting shows that knots cannot be considered as punctual objects (Fig. 3). They have an extension in the netting normal direction. Consequently, it is proposed to model netting knots with a bar as shown in Fig. 5. Observation also show that twines are not embedded in knots with a null angle between two adjacent twines.

In order to define the angle of twine free of load, we define a local referential linked to the knot (Fig. 4).

The local orthonormal referential is defined by vectors \vec{N} and \vec{T} . \vec{N} is aligned with the so-called normal direction of the netting, which defines the orientation of netting nodes. \vec{N} is simply defined by the bar B_{ij} and is normalized. Vector \vec{T} is first approximately defined with $\vec{t} = \text{normalised}(\vec{B}_2 + \vec{B}_3 - \vec{B}_1 - \vec{B}_4)$ where \vec{B}_i is the vector oriented from the central node to the other end of bar B_i , and the normalization function is defined by $\text{normalised}(\vec{u}) = \frac{\vec{u}}{\|\vec{u}\|}$. All \vec{B}_i have the same length in this application.

Vector \vec{t} is a unit vector close to \vec{T} but that does not ensure orthogonality with \vec{N} . Using $\vec{n} = \vec{t} \wedge \vec{N}$ defining a unit vector normal to the average mesh plan, $\vec{T} = \vec{n} \wedge \vec{N}$ can be calculated which is normal to \vec{N} . Thus (\vec{N}, \vec{T}) defines a local orthonormal system to the node and is

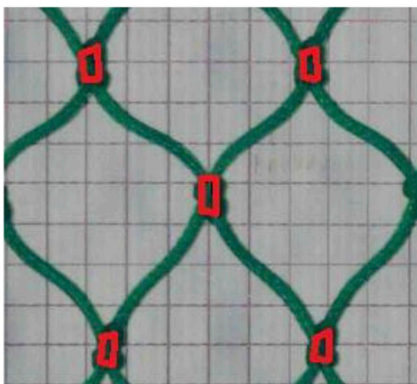


Fig. 3. Piece of netting: knots underlined in red cannot be considered as points. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

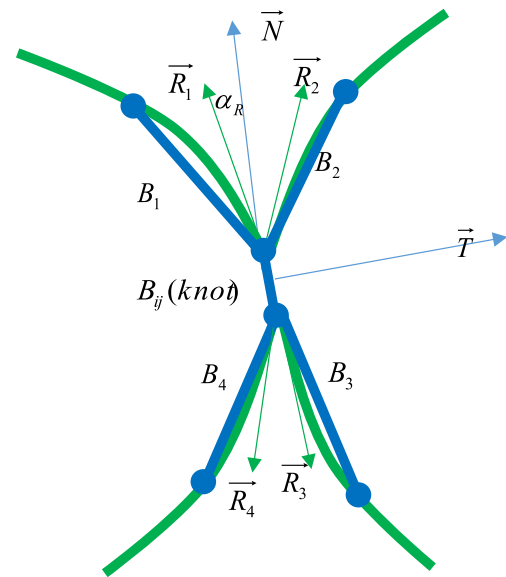


Fig. 4. Local numbering and referential to define the orientation of bars. Green lines denotes actual twines and blue lines denote modelled lines. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

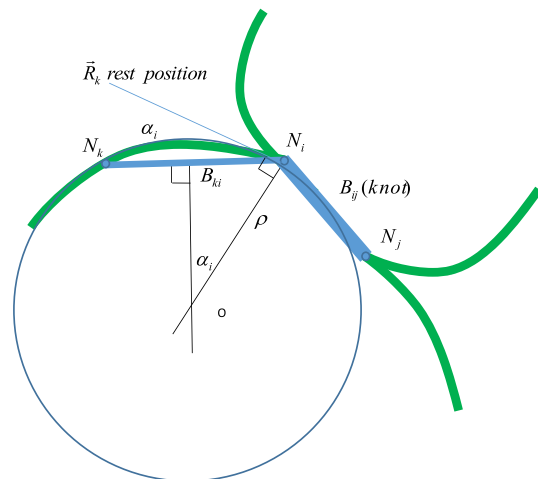


Fig. 5. Assessment of the curvature of a twine embedded in a knot. \vec{R}_k is not aligned with B_{ij} , we consider the circle tangent to \vec{R}_k and passing through N_k and N_i . Green lines denote actual twines and blue lines bars model twines or knots. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

used to define the rest position of bars linked to this node.

Vectors \vec{R}_i denote the rest orientation of bar i . Assuming the rest angle α_R is known and a knot and its 4 bars are symmetrical at rest, \vec{R}_i is simply calculated as follows:

$$\vec{R}_1 = -\sin \alpha_R \vec{T} + \cos \alpha_R \vec{N}$$

$$\vec{R}_2 = \sin \alpha_R \vec{T} + \cos \alpha_R \vec{N}$$

$$\vec{R}_3 = -\vec{R}_1$$

$$\vec{R}_4 = -\vec{R}_2$$

The shape of the bended twine embedded in knot B_{ij} is supposed to be

approached by the circle tangent to \vec{R}_k at the node N_i and passing through the node N_k (Fig. 5). We obtain the following expression of the radius of curvature:

$$\rho = \frac{\ell_{ik}}{2 \sin(\alpha_i)} \text{ and } M_i = -EI \frac{2 \sin(\alpha_i)}{\ell_{ik}}$$

We assume that angles and moments are positive when turning counterclockwise on Fig. 2 Figs. 4 and 6. Then $M_{ij} < 0$ is the moment applied on B_{ki} by B_{ij} and $-M_{ij} > 0$ is the moment applied on B_{ij} by B_{ki} .

2.4.3. Tridimensional implementation

Explanations given from Figs. 3–6 are valid for a 2D sketch. When considering 3D models, bending moments are applied on each bar by the mean of forces normal to the plan defined by the 2 bars (Fig. 6).

For instance, the bending moment M applied by bar B_{ki} on bar B_{ij} is $M = F_{ij} \ell_{ij}$ where ℓ_{ij} is the length of bar B_{ij} . Force $F_{ij} = \frac{M}{\ell_{ij}}$ is applied on node N_j and $-F_{ij}$ is applied on node N_i to keep the resultant of forces applied on the bar B_{ij} constant.

Forces applied on B_{ij} and on B_{ki} have then to be calculated. These forces are coplanar to $(B_{ki}B_{ij})$ as no torsion moment is assumed.

We need to calculate a unit vector having the same direction and orientation of the force. Let's call \vec{u}_{ij} the unit vector normal to B_{ij} , coplanar to $(B_{ki}B_{ij})$, being oriented so that $\vec{N}_k \vec{N}_i \cdot \vec{u}_{ij} > 0$ and \vec{u}_{ki} is the unit vector normal to B_{ki} , coplanar to $(B_{ki}B_{ij})$, being oriented so that $\vec{N}_j \vec{N}_i \cdot \vec{u}_{ki} > 0$

The unit vector normal to $(B_{ki}B_{ij})$ is defined as follows:

$$\vec{m}_{ijk} = \frac{\vec{N}_j \vec{N}_i \wedge \vec{N}_k \vec{N}_i}{\|\vec{N}_j \vec{N}_i \wedge \vec{N}_k \vec{N}_i\|}$$

If $\vec{N}_j \vec{N}_i$ and $\vec{N}_k \vec{N}_i$ are collinear, the bending moment is zero.

The unit vectors supporting the forces applied on B_{ki} and B_{ij} can be calculated with:

$$\vec{u}_{ij} = \vec{m}_{ijk} \Lambda \frac{\vec{N}_j \vec{N}_i}{\|\vec{N}_j \vec{N}_i\|} \text{ and } \vec{u}_{ik} = -\vec{m}_{ijk} \Lambda \frac{\vec{N}_k \vec{N}_i}{\|\vec{N}_k \vec{N}_i\|}$$

Forces applied to model the bending torque are calculated from the moment $\vec{M} = \vec{d} \wedge \vec{F}$ where \vec{d} is the so-called moment arm. Using the relation of the double cross product:

$$\vec{u} \Lambda (\vec{v} \wedge \vec{w}) = (\vec{u} \cdot \vec{w}) \vec{v} - (\vec{u} \cdot \vec{v}) \vec{w},$$

we get

$$\vec{F} = -\frac{\vec{d} \wedge \vec{M}}{d^2}$$

Consequently, forces to implement are:

$$\vec{M}_i = -EI \frac{4 \sin(\frac{\alpha_i}{2})}{\ell_{ij} + \ell_{ik}} \vec{m}_{ijk} \text{ for modelling twine bending force, which leads}$$

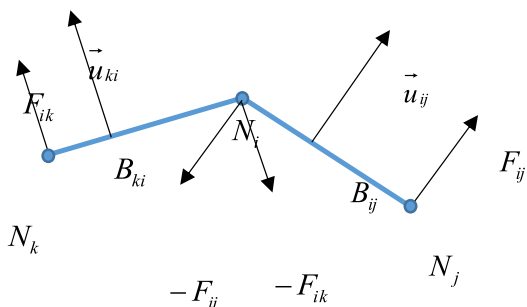


Fig. 6. Forces applied on bars to implement bending moments.

to: $\vec{F}_i = EI \frac{4 \sin(\frac{\alpha_i}{2})}{\ell_{ij} + \ell_{ik}} \vec{u}_{ij} \vec{M}_i = -EI \frac{2 \sin(\alpha_i)}{\ell_{ik}} \vec{m}_{ijk}$ for modelling embedded twine bending, which leads to:

$$\vec{F}_i = EI \frac{2 \sin(\alpha_i)}{\ell \ell_{ik}} \vec{u}_{ij}$$

With ℓ is denoting the bar length where the force torque is applied.

3. Determination of the physical properties of the netting model by inverse identification

3.1. Particle Swarm Optimization algorithm

In the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm (Kennedy and Eberhart (1995); Reynolds (1987)), particles are defined that represent, each, a potential solution to the optimization problem to be solved. These particles are defined in the solution domain by a position, noted \mathbf{X} , and their speed,¹ noted \mathbf{V} . They are then flying smartly through the solution domain, by following each other to finally converge together to the global minimum of the considered objective function. The speed and the position of particle i are then re-calculated at each iteration $t+1$ of the optimization process, as follows:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_i^{t+1} &= \omega \times \mathbf{V}_i^t + c_1 \times r_1 \times (\mathbf{P}_{i,best}^t - \mathbf{X}_i^t) + c_2 \times r_2 \times (\mathbf{G}_{best}^t - \mathbf{X}_i^t) \\ \mathbf{X}_i^{t+1} &= \mathbf{X}_i^t + \mathbf{V}_i^{t+1} \end{aligned}$$

where $\mathbf{P}_{i,best}^t$ is the personal best position of particle i found so far, given in terms of a position in the solution domain, \mathbf{G}_{best}^t is the global best position found so far by the swarm. ω is an inertia, that is the influence of the previous speed on the calculation of the new one, c_1 and c_2 are confident parameters, weighing the influence of the entire swarm versus the personal memory of the particle, r_1 and r_2 are random parameters defined in $[0; 1]$. ω is balancing the abilities of the algorithm to (i) explore the solution domain with a high value of ω , (ii) exploit promising areas of the solution domain with a lower value. Then, c_1 and c_2 have to be chosen carefully to optimize the capabilities of the algorithm to converge to the global minimum of the objective function. Moreover, the positions and speeds of the particles have to be constrained for the calculation to converge. The speed is then defined in $[-V_{max}; V_{max}]$, where V_{max} is defined as a function of the solution domain, to be given in the same order of magnitude, such as $V_{max} = (X_{max} - X_{min})/2$ where X_{max} and X_{min} are the extremal values defining the solution domain.

As it has been demonstrated in Di Cesare et al. (2015), the PSO particles can be seen as a Markov chain, and the transition probabilities can be seen as the influence of the particles on each other. The transition probability matrix can then be recalculated at each iteration of the optimization process, by considering the particles' respective performance regarding the best one as the steady-state of the Markov chain to be fitted. In a previous work Di Cesare et al. (2015), this inverse PageRank-PSO algorithm has been proposed, using the PageRank – an artificial intelligence algorithm used by the world famous search engine Google – to redefine the influences of all the particles on all the others at every iteration of the optimization process. The PSO equations are then modified in the following way:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_i^{t+1} &= \omega \times \mathbf{V}_i^t + c_1 \times r_1 \times (\mathbf{P}_{i,best}^t - \mathbf{X}_i^t) + c_2 \times r_2 \times \sum_{j=1}^n C_{ij} \times (\mathbf{P}_{j,best}^t - \mathbf{X}_i^t) \\ \mathbf{X}_i^{t+1} &= \mathbf{X}_i^t + \mathbf{V}_i^{t+1} \end{aligned}$$

where C is the transition probability matrix, defined by the inverse PageRank algorithm, and defining the influence of all the particles on

¹ Called « the speed » in the literature, \mathbf{V} is actually a displacement.

the others.

The Inverse-PageRank-PSO algorithm has been used in this work to identify the constitutive parameters of the flexural rigidity model of the fishing net.

3.2. Choice of variables to optimize

The numerical model described in previous sections is driven by a set of variables representing the mechanical and dimensional properties of the tested netting material: axial rigidity k , flexural rigidity EI , length of the bar used to model the physical knot, mesh side length and rest angle (half mesh angle when the mesh is free of load), twine weight and the amount of twines contained in a knot.

Some of these variables have been determined by simple measurements or approximations. This choice reduces the complexity of the optimization step and avoids potentially negative angles or distance (De La Prada and Gonzalez (2015); Sala et al. (2007)). Mesh side length has been measured as the distance between the centers of two adjacent knots. An averaging process is described in the experimental protocol. Linear axial rigidity can be measured through a “stress-strain” experiment. Alternatively, the approximation proposed in section 2.4.1. has been used in the present work. Twine linear weight is a known characteristic supplied by the net maker, known as the twine “runnage”. It has been weighed as detailed in the experimental protocol. The amount of twine contained in a knot is needed to calculate the weight of a netting piece. We have used the netting “braiding factor” approximately equal to $1 + \frac{8D}{c}$ where D is the twine diameter and c in the mesh side (Prado and Dremière (1988)).

Other variables have been identified: the length of the bar used to model the physical knot could be set to 3 times the twine diameter (Prado and Dremière (1988)). However, physical knots are not symmetrical, their shape depends on twine angle. Thus this variable has been identified through the optimization process. Morvan has measured the rest angle of a piece of netting put on a horizontal vibrating table to ensure that friction forces have a negligible effect. Taking into account the plasticity effects, we assume that the rest angle cannot have a constant value and cannot be measured at rest before deformation cycles, as a traction experiment will definitely modify the shape of the netting model. Thus the rest angle has been identified by the optimization process. EI has also been identified.

The flexural rigidity, the length of the bar used to model the physical knot and the rest angle are defined as the design variables to be identified through the optimization process.

3.3. Numerical test case and effects of discretization

3.3.1. Size of the test case

The test problem is chosen to be easily reproduced by a physical experiment. By knowing the possible variation of dimensional characteristics of netting material, the test case used has 3 meshes in the normal direction and 6 meshed in the transverse direction.

De La Prada and Gonzalez (2015) used a netting section of 3 x 8 meshes and Morvan et al. (2016) used a section of 5 x 10 meshes. In section 4.1 it is shown that experimental results are reproducible with different netting sections taken on the same netting panel or sell unit.

In order to simulate the physical netting model, the 3x6 virtual meshes model is suspended vertically to a horizontal support, where the 3 upper nodes are free to move only in the support direction with no friction (Fig. 9). Different vertical forces are applied to the 3 lower nodes to model the effect of calibrated weights that will stretch the net during the experiment. The length of the model is defined by the average distance between upper nodes and lower nodes and its width is defined by

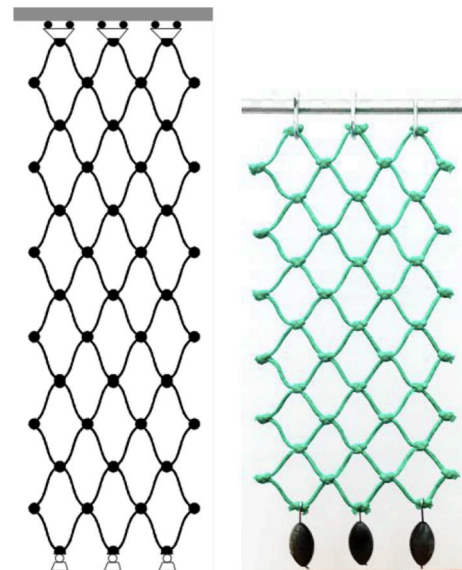


Fig. 8. Experimental setup made of a 3x6 meshes piece of netting. The model is set with normal direction horizontally and transverse direction vertically (so-called T90 usage). The 3 upper nodes are free to move in the horizontal direction and blocked in other directions.

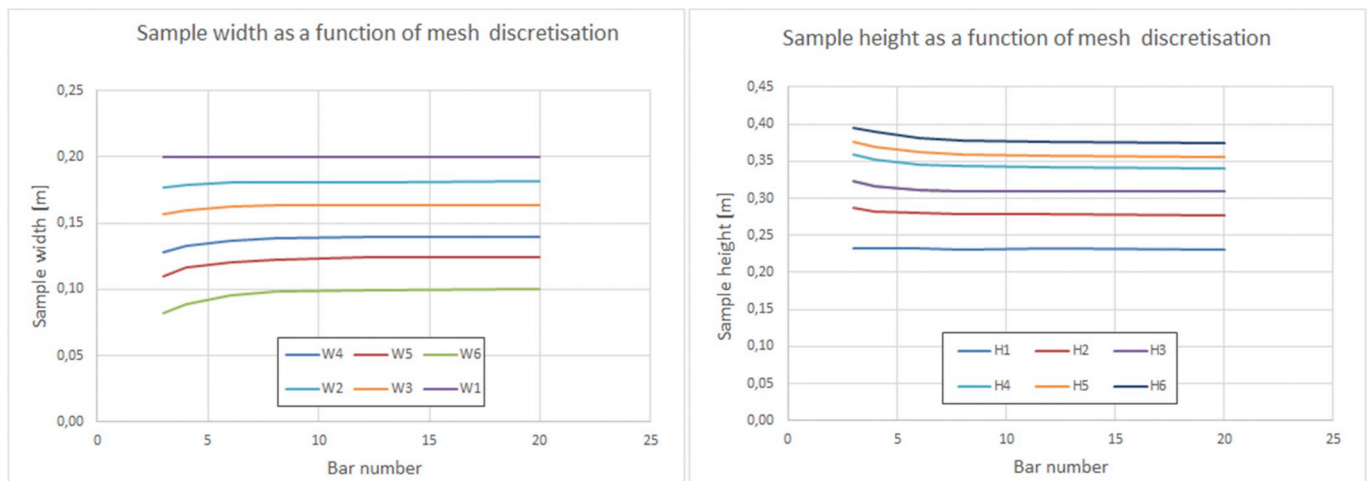


Fig. 7. Calculated width W_i and height H_i for different loads as a function of the discretization.

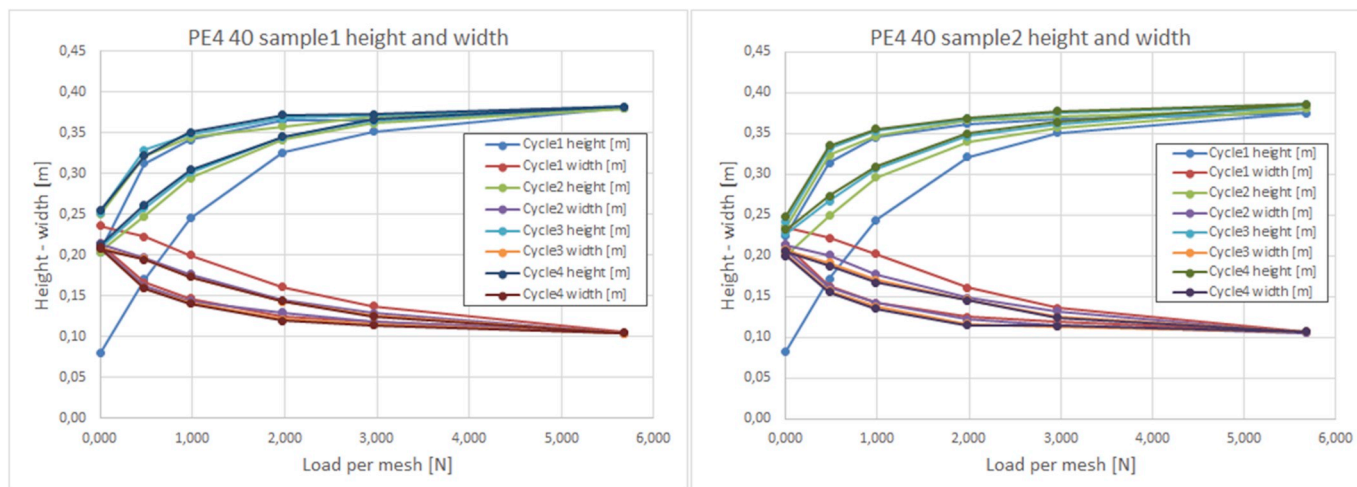


Fig. 9. Measured heights and widths for different loads on PE4 40, sample 1 and sample 2.

the average distance between left nodes and right nodes (see Fig. 8).

3.3.2. Discretization effects

The choice for the sample model discretization is a compromise between accuracy of equations resolution, particularly the calculation of twines curvature radius, and the complexity of the calculation. Six different mesh discretization are compared for PE4x40 samples: 3, 4, 6, 8, 12 and 20 bars per mesh side. Calculated values of Heights (Hi) and Widths (Wi) for weight i (see Table 2) are shown on Fig. 7. One can observe a rapid convergence to a nearly constant value for discretization finer than 6 bars. For each discretization, Table 1 shows the sample width and height relative differences with the finest discretization values. Compared to the finest discretization, the 6 bars discretization leads to a maximum difference of -4.34% (width) and 2.5% (height) which seems a reasonable compromise. Consequently, the discretization level has been set to 6 bars and the all presented results are obtained with this mesh side discretization.

3.4. Experimental protocol

The netting samples dimensional characteristics were measured with a sliding caliper and a mm scale. Twelve twines (6 meshes in the T direction) were set together side by side on a plane and the average diameter was measured as the sample thickness. This measurement was repeated 6 times per sample for the 3 meshes in the N direction, thus each twine of the sample was taken into account. Notice that the measured diameter is not used in the calculations. Average mesh length was calculated from the measurement of 6 aligned mesh sides, between 2 knot centers (6 measurements per sample of 3 x 6 meshes). Uncertainties were deduced from min and max values.

The experimental setup (Fig. 9) was made of a netting sample with 3 meshes set horizontally and 6 meshes set vertically. Normal netting direction was horizontal and transverse direction was vertical. The 3 upper meshes were linked to 3 hooks that were manually moved on the horizontal support to set them vertically. This prevents the induction of

Table 1
Relative difference (%) between Hi (Wi) with the finest discretization.

Number of bars	H1	W1	H2	W2	H3	W3	H4	W4	H5	W5	H6	W6
3	0.48	-0.10	3.79	-2.53	4.56	-4.46	5.40	-8.11	5.78	-11.54	5.74	-17.94
4	0.39	-0.05	2.06	-1.32	2.52	-2.32	3.29	-4.52	3.59	-6.30	4.06	-10.90
6	0.26	0.00	1.08	-0.66	0.94	-0.79	1.38	-1.65	1.63	-2.50	2.03	-4.34
8	-0.17	0.10	0.61	-0.39	0.29	-0.18	0.65	-0.57	0.79	-0.97	1.10	-1.97
12	0.30	-0.10	0.40	-0.22	-0.06	0.12	0.15	0.00	0.22	0.00	0.40	-0.53
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table 2

Applied loads, number, mass and weight in newton.

Load number	W1	W2	W2	W4	W5	W6
Mass [gr]	0	144.6	300.5	605.4	906.0	1735.0
Total load [N]	0	1.43	2.99	5.94	8.89	17.02
Load per mesh [N]	0	0.477	0.983	1.980	2.963	5.677

transversal force components to the netting sample. The netting sample was stretch using lead weights. In order to apply uniform loads on the lower 3 knots, each weight was eventually adjusted by removing some lead with a small diameter drill. The weights were checked using a calibrated balance PE6000 Mettler Toledo. The maximum uncertainty of weights value is 0.4 gr. Six different charges were set to the 3 lower knots to stretch the netting sample, the mass in grams of the weights are shown in Table 2:

The maximum weight value has been determined so as to produce the maximum stretch of the netting section, due to flexural deformation. Larger weights lead to axial elongation and the model width does not decrease significantly. No pre-loading stage is processed, except the one applied during the netting manufacturing process. Two samples of each netting type were tested. Their characteristics are detailed in Table 3.

Plasticity effects were studied through a series of charge and discharge cycles. For each cycle, the following operations were performed on the experimental setup for each of the 6 loads W1 to W6 and then for the 5 loads from W5 to W1 as follows:

1. Set the charge at the 3 lower knots
2. Move the hooks to ensure that there is no transversal load on the upper knots
3. Wait 50 min and periodically check hooks are still vertical, otherwise move them accordingly
4. Measure the 3 distances between the upper and lower knots, 2 by 2, and calculate the average height

Table 3
Tested netting dimensional characteristics and mass.

Sample designation and material	Diameter [mm]	Avg Mesh side [mm]	Sample number and Sample size [mesh number N x mesh number T]	Avg. sample mass [kg]
Green polyethylene PE3 40	2.6 ± 0.1	39.33 ± 0.3	2 sample of 3x6 meshes	0.0191
Green polyethylene PE4 40	3.7 ± 0.2	38.83 ± 0.3	2 sample of 3x6 meshes	0.0265
Green polyethylene PE4 60	3.4 ± 0.2	60.80 ± 0.5	2 sample of 3x6 meshes	0.0365

5. Measure the 6 distances between the left and right knots, 2 by 2, and calculate the average width
6. Go to step 1 using next charge case or go to next cycle if unload is finished

Distances were measured with a mm precision ruler. The estimated measurement uncertainty is ±1 mm.

The duration of 50 min has been chosen to ensure that the sample reached an almost constant height so that the plastic deformation is taken into account. The criterion used was the height increased/decreased by less than 1% in a 10 min interval.

Cycles were repeated until the experimental protocol produces repeatable height and width measurements with a maximum relative difference of 3% on the height. Following this criterion, we observed that the cycles 3 and 4 were reproducible. Heights (widths) are then averaged for the cycles 3 and 4 for each weight. The lengths measured in the load process are averaged with the lengths measured in the unload process. Finally, for each load, measured deformations for the 2 samples are averaged to be used in optimization process in the objective of supplying the end user with averaged nettings characteristics.

4. Results

4.1. Experimental results

Three different netting types have been studied (Table 3). Measured heights and widths for the 4 load/unload cycles are presented on Fig. 9 for PE4 40. Graphics for other nettings and detailed values are presented in the Supplementary material. The maximum relative height difference between cycles 3 and 4 is 2.16% for PE4x40 sample.

4.2. Inverse identification results

Heights and widths presented in Fig. 10 are used to identify EI, the rest angle and the length of the virtual knot for PE4 40 netting. The quality of the identification is tested through the standard determination coefficient R² and the mean absolute percentage error (MAPE):

$$R^2 = \frac{1}{N} \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad MAPE = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right|$$

Where \hat{y}_i are the experimental points (the objectives of the optimization) and y_i are the simulated points. \hat{y} is the average objective. During the optimization process, MAPE was used to calculate the error function.

The parameters of Inverse-PageRank PSO are the following: $c_1 = c_2 = 2$ and ω is linearly decreasing from 0.8 to 0.4 as the iterations are going. The boundaries of the design domain are defined separately for each design variable as given in Table 4, and the extremal particles' displacements are defined as 20% of these design domains.

Table 5 shows the identified values for the 3 parameters for the different tested nettings and Fig. 11 shows the simulation results with

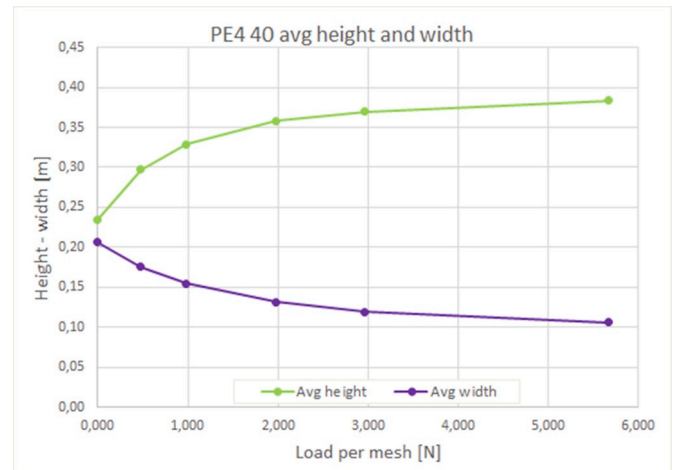


Fig. 10. Averaged measures (sample 1 and sample 2 for cycles 2 and 3) for the different loads.

Table 4
Design domain definition.

	Extrema position
Angle [°]	[0; 70]
Stiffness [N/m ²]	[1e-5; 1e-3]
Knot length [mm]	[0.002; 0.015]

Table 5
Optimization results for PE3x40 PE4x40 and PE4x60.

	EI [N/m ²]	Angle [°]	Knot length [mm]	R ²	MAPE%
PE3x40	4.30E-05	33.50	5.34	0.9968	2.69
PE4x40	8.66E-05	32.4	5.02	0.9957	2.27
PE4x60	8.84e-05	40.21	8.86	0.9986	2.08

identified parameters compared to experimental results.

4.3. Comparison with other author's results

The current methodology was applied to identify parameters from experimental results established by Morvan et al. (2016) with a different experimental protocol. The author measured the vertical elongation of netting sample made of different materials (Table 6).

The two main differences between the experimental protocols used by Morvan and the one used in the present work are (1) the measurement of the rest angle on the sample at rest on a vibrating table to remove friction effects vs. the identification of the rest angle in present work and (2) no particular care to take into account plasticity effects vs. the use of the last repeatable cycles after several load/unload cycles in the present work. This last difference can be the cause of differences between parameters identified in the present work experiments and Morvan's experiments. Moreover, 10 samples of each material were tested by the author.

An important modeling difference comes from the node length: it is not taken into account by Morvan (there is no virtual knot) while it is taken into account in the present work

The 3 variables (EI, angle at rest and node length) have been identified with a 6 bars model from the average elongation of all samples for each load. Measured average samples and calculated elongations with the optimized parameter are shown in Fig. 12.

Table 7 summarizes the results and shows the values of identified parameters. Roughly we can observe EI values are smaller for present methodology, as expected De La Prada and Gonzalez, (2015) have

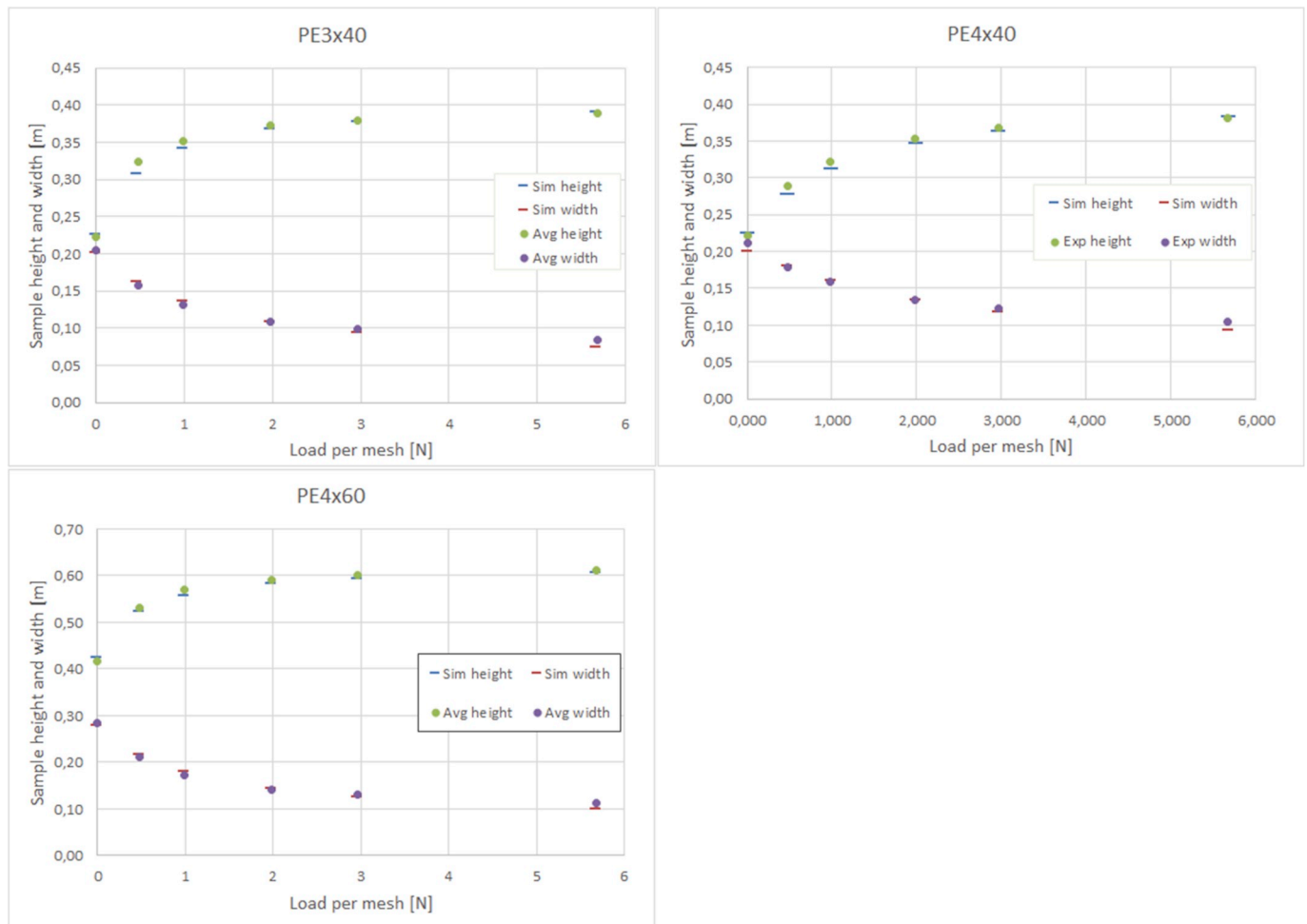


Fig. 11. Simulation with optimal parameters and experimental results for PE3x40, PE4x40 and PE4x60.

Table 6
Description of samples used by other authors. Brezline and Breztop are trademarks of LE DREZEN Company.

Material and designation	Diameter [mm]	Mesh side [mm]	Sample number and Sample size [mesh number N x mesh number T]	Average mass sample [kg]
Green polyethylene PE4x40_b	3.14	40.44	10 samples of 4x10 meshes	0.0618
Double twine green polyethylene DPE4x50_A	3.14	49	5 samples of 4x10 meshes	0.164
Double twine green polyethylene DPE4x50_B	3.14	49	5 samples of 5x25 meshes	0.486
Breztop polyethylene BTPE2.5x40	2.5	40	10 samples of 4x10	0.0184
Brezline polyethylene BLPE4x60	4	59.84	10 samples of 4x10	0.1176

studied different netting materials. One sample of 4x8 meshes for each netting. It cannot be stated that fibers constituting twines are the same than the one used in present work. Measured heights and widths are not detailed, thus identification using present method cannot be undertaken from her measurements. Moreover, she has presented different results

derived from different modelling, with or without optimization parameters constraints and the parameters were identified separately for the load and unload processes. De La Prada results with min/max constrain on all parameters and present work results are compared in Table 8.

4.4. Sensitivity analysis

The value of each of the three variables (flexural rigidity, mesh angle at rest, knot length) is separately increased by 10% from its optimal value to assess the effect on the calculated sample width and height for each load. This can be interpreted as assessing the error on geometry parameters (samples width and height) resulting from an identification error of a driving parameter.

EI, the rest angle and the node length are increased by 10% from their respective optimal values. Errors on height and width, and maximum errors observed are given in Table 9.

4.5. Application to the simulation of netting tubes shape

Two tubes were built from PE4 40 and PE3 40 netting. Each tube has 29 meshes in circumference and is 35 meshes high. So as to ensure the circular shape continuity, knots of each sides were welded together two by two. Each tube was attached to a horizontal rigid 65 cm diameter circular frame with regular spacing between knots. The protocol used to assess the load-geometry relation was similar to the one described in 0: the total load (among 0N, 8.84N, 20.15N, 30.03 N, 41.91N) was attached to the lower knots. After a period of 50 min, the following

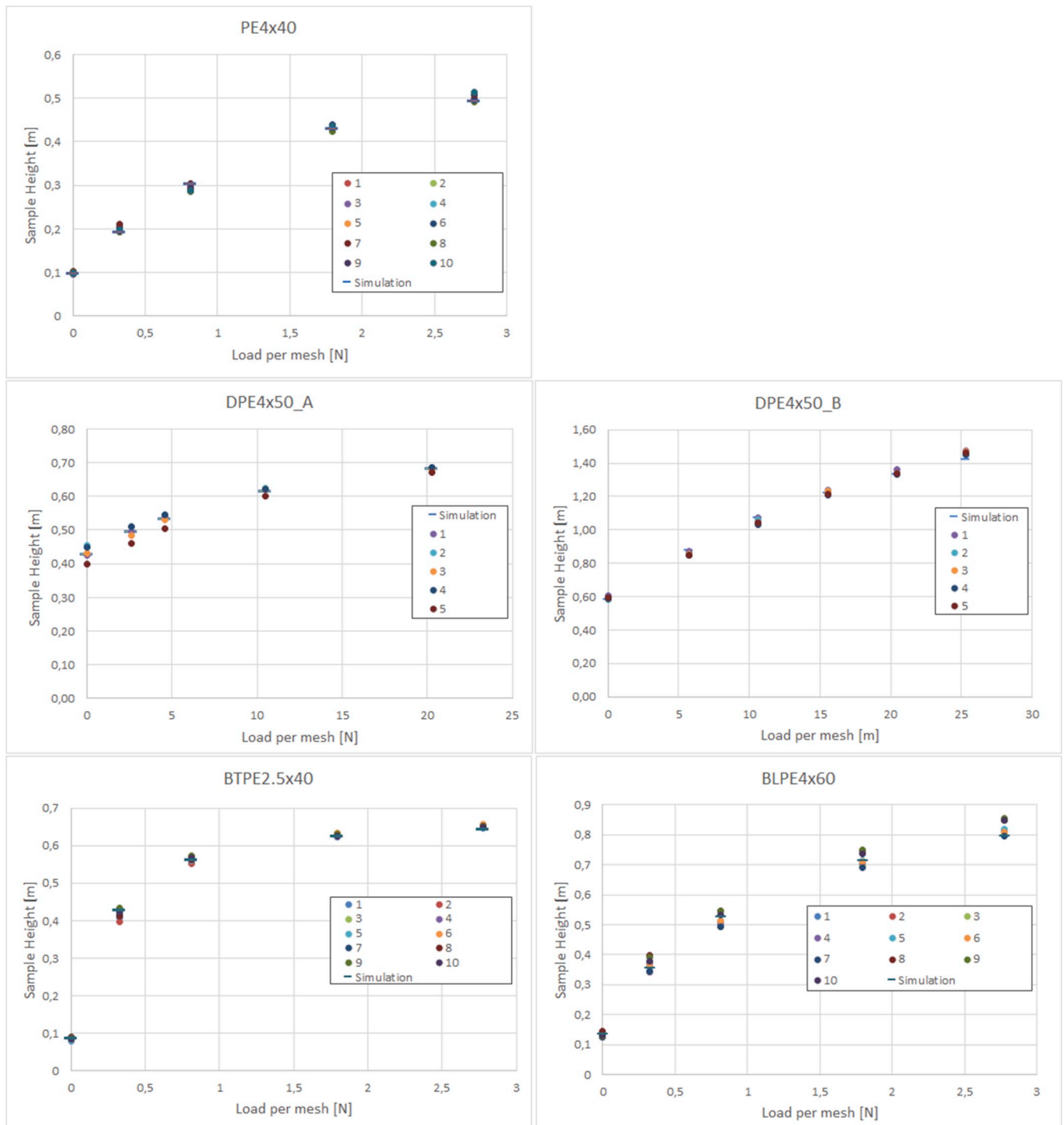


Fig. 12. Sample elongation as a function of load per mesh, experimental results (points) and calculation results for optimal parameters set.

characteristics were measured with a mm ruler:

- Average height,
- Minimum diameter at the neck of the tube
- Distance from the upper part of the position of the minimum diameter
- Average diameter of the lower part of the tube,

Heights and diameters were measured 3 times (at 120°) and averaged. The first cycles were ignored until repeatable geometrical characteristics could be measured.

The simulations were achieved with the 6-bars model. Fig. 13 shows the measurement and simulation results with identified parameters for each netting (see Fig. 14).

Results provided by the model are in reasonably good agreement with measures for height and diameters. Large relative errors were sometimes found for the position of the tube neck. It must be noticed that the cylinders are not perfectly symmetrical, due to the welding process and inhomogeneous netting. This brings to measurement uncertainties. Moreover, this result can be explained by the difficulty to accurately measure the neck position.

Table 7
Optimization results from other authors experiments.

	Present work results			Morvan results	
	R ²	EI [N/m ²]	Rest angle [°]	EI [N/m ²]	Rest Angle [°]
PE4x40_b	0.998425	8.07E-05	7.08	1.80E-04	7.00
DPE4x50_A	0.999522	3.22E-04	30.7	6 to 8e-4	24.29
DPE4x50_B	0.994542	3.88E-04	12.9	6 to 8e-4	24.29
BTPE2.5x40	0.999312	1.71E-05	1.35	3.5 to 5.5e-5	6.13
BLPE4x60	0.997388	1.30E-04	0.68	2.5 to 3.5e-4	6.32

5. Discussion

This article presents a new method to identify flexural rigidity, rest angle, knot length and enables the simulation of large deformation of

nettings constructions including 3D flexural rigidity. The two-dimensional flexural rigidity EI has already been addressed in previous studies (De La Prada, 2014; De La Prada and Gonzalez, 2015; De La Prada and González, 2016; Morvan et al., 2016), as well as the mesh angle at rest (De La Prada and Gonzalez (2015); De La Prada and González (2016)). The length of the physical knots has been added taking into account plasticity effects.

Present method was applied to the set of experimental data of Morvan et al. (2016), where the netting knots length is null and identification results were compared. The stretch mesh length being the same in both approaches, mesh sides (excluding the knot length) are then slightly shorter when modeling a virtual node in the present work. Consequently, we could anticipate over estimated EI values for Morvan: his mesh sides being longer, higher EI values leads to the sample height for a given load. This assumption is verified for each netting type: Morvan’s EI values are roughly 2 times greater than values identified by present method on his experimental values. Rest angle has been

Table 8
Comparison for PE3x40 and PE4x40 with other author’s results, loading and unloading cycles.

	Present work results			De La Prada results			
	R ²	EI [N/m ²]	Rest angle [°]	EI [N/m ²]	Rest Angle [°]	R ²	
PE3x40	0.9968	4.30E-05	33.5	3.4 to 5.7 e−5	7 to 15	0.9931 to 0.9984	loading
				1.2 to 3.1 e−5	44 to 50	0.9635 to 0.9903	unloading
PE4x40	0.9957	8.66E-05	32.4	6.6 to 11.9 e−5	15 to 19	0.9949 to 0.9996	loading
				2.2 to 4.2 e−5	44 to 50	0.9860 to 0.9930	unloading

Table 9
Effect on height and width of a 10% overestimation of EI.

Charge [N]	EI		Rest angle		Node length	
	errHeight [%]	errWidth [%]	errHeight [%]	errWidth [%]	errHeight [%]	errWidth [%]
0.00	−0.50	0.14	8.28	−1.97	−2.48	0.33
1.42	−1.94	2.02	2.52	−2.61	−3.03	1.94
2.95	−1.55	3.34	1.37	−2.36	−2.74	2.95
5.94	−0.83	3.89	0.79	−2.39	−2.55	4.13
8.89	−0.42	3.13	0.58	−2.26	−2.38	4.38
17.02	−0.19	2.64	0.32	−1.72	−2.33	5.64
Max. error [%]	3.9		8.3		5.6	

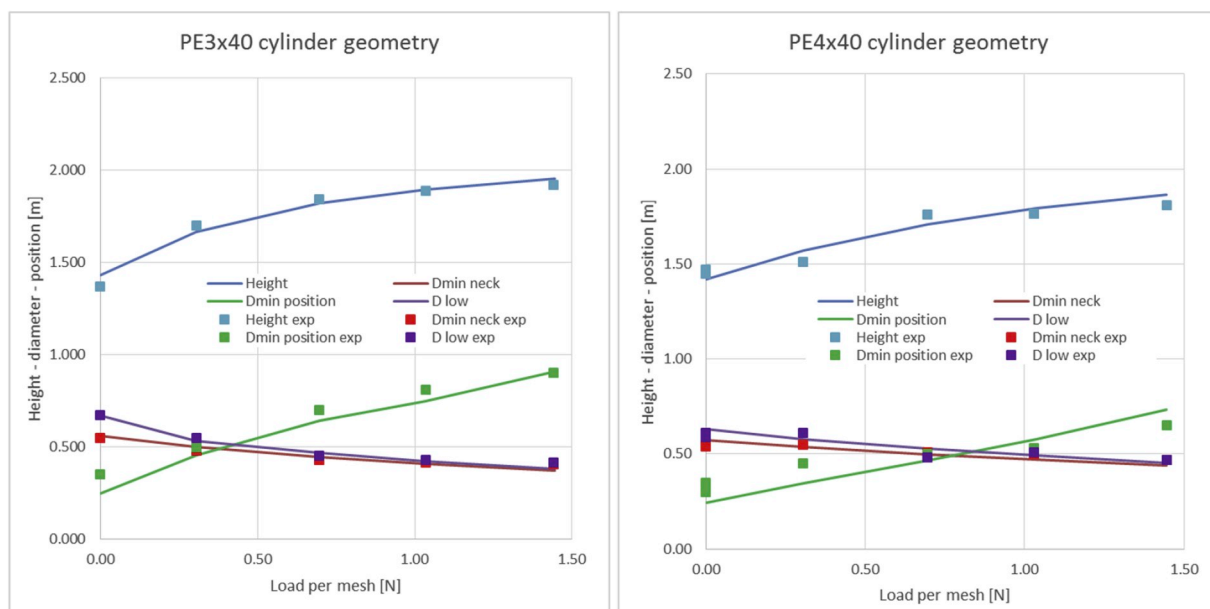


Fig. 13. PE3 40 and PE4 40 netting tubes. Measured height, diameter and position of minimum diameter [m] as a function of the load per mesh [N] (points) and simulation (lines).

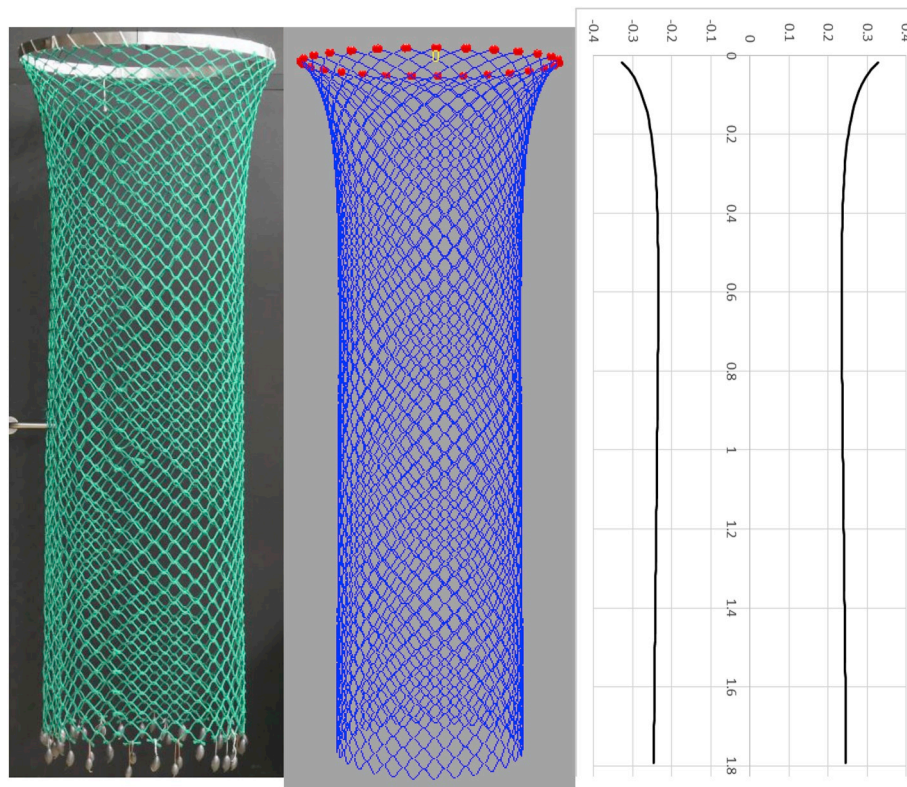


Fig. 14. PE4 40 netting tube under the load of 1.04 N per mesh. From left to right, photo taken during experiment, 3D view of the simulation result, simulated profile in a symmetry plane.

measured with no load (vs. identified in present work) but values are not significantly different (Table 7). As expected, rest angle value for same netting types are greater for the present work (33.5° vs. 7° for PE4x40 and 40.21° vs. 6.32°). Taking plasticity effect into consideration, identified EI value for PE4x40 and PE4x60 using present experimental protocol (respectively $8.66E-05$ and $8.84E-5$ N/m²) are expected to be smaller than Morvan's values. Indeed, the sample heights for load/unload cycles 3 and 4 are greater than for a single cycle (Morvan's protocol). This assumption is also verified.

Identified parameters for PE3x40 and PE4x40 were compared to De La Prada and Gonzalez, (2015) results. The comparison is easier as the methodologies are closer. The two methods differ by a separate identification for load and unload and by different (constrained, unconstrained parameters) optimization approaches. Results are quite comparable: EI and mesh angle at rest for the present work are inside the extrema depending on the modeling method used by the author, averaged De La Prada EI (load and unload, min/max constrain) for PE3x40 is $3.35E-05$ N/m² (vs. $4.30E-05$) and $6.22E-05$ N/m² for PE4x40 (vs. $8.66E-05$). Average angle at rest is 29° (vs. 33.5°) for PE3x40 and 32° (vs. 32.4°) for PE4x40.

EI values for different mesh sides with same twine diameter should be close. In the case of 4 mm diameter netting, this assumption is verified in present work ($8.66E-05$, $8.84E-5$ N/m², 2% difference) but is not verified for Morvan's 4 mm samples ($8.07E-05$, $3.22E-04$, $3.88E-04$, $1.30E-04$ N/m²). Furthermore, inertia varies with the 4th power of the diameter. The ratio between EI (4 mm) and EI (3 mm) is around 2 in present work and for averaged De La Prada values, but is expected to be around 3.2 (around 3.3 when considering measured diameters). Possible characteristic dispersion of the fibers constituting the different twines, twine diameter reduction when load increases could explain this result.

The number of samples (2 samples in present work compared to 1 sample studied by De La Prada and 10 or 5 (double twine) samples studied by Morvan) and the size of each sample (3x6 meshes for each

netting vs. 4x8 meshes for De La Prada and 4x10 or 5x25 (double twine) meshes for Morvan) does not seem to have a major influence on EI results: less than 5% variation for the 10 samples of Morvan). It confirms our choice for sample number and size. It also confirms our choice to consider the average height and width values for each sample pair. Moreover, identified values applied to larger netting structures (cylinders made of 29 meshes in circumference and is 35 meshes height) lead to calculated cylinder heights that compare with experimental values with MAPE errors of 2.98% for 4x40 cylinder and 1.92% for 3x40 cylinder.

Nevertheless the identified node length (5.34 5.02 and 8.86 mm respectively for PE3x40 PE4x40 and PE4x60) differ from expected values, about 3 times the diameter (De La Prada and Gonzalez (2015); Prado and Dremière (1988)). This can be interpreted as an attempt to optimize driving parameters so as to compensate imperfect mechanical model, for instance plasticity which is not modelled.

The capacity of the developed model to reproduce experimental data is not perfect ($R^2 < 0.999$, MAPE>2%) especially with larger loads. This can be explained by (1) modeling hypothesis: the twines diameter is supposed to be constant but it decreases when tension increases; friction among fibers constituting twines is not taken into account, thus EI is not constant as it has been shown by Morvan et al. (2016):EI varies by less than 6% for single twine PE and less than 10% for other materials with larger variations for lowest loads. (2) The model does not take into account plasticity effects and consequently cannot reproduce them. Thus, when averaging load and unload cycles, the resulting optimization objectives become more difficult to fit. In the same way, the number of objectives has been increased with the measured sample width, which reduces the possibility to perfectly fit them. However, the precision observed for cylinder models (MAPE<3%) makes this methodology a good candidate for fisheries applications by taking into consideration the uncertainties of nettings and fishing gear characteristics.

A rapid sensitivity study has shown that the more sensitive variable is

the mesh angle at rest but however with no amplification effect: the output model uncertainty remains lower than the angle uncertainty. In the meantime, there is a lack of unified methodology among different authors to identify the mesh rest angle.

Future work should consider the plasticity in the modeling and a more realistic model for the netting knot: the way twines are embedded in an actual knot is different for the 4 twines, knots are not symmetrical and their shape change with the mesh load. This could lead to improve of the experimental protocol. Studying artificially aged netting materials could be complementary to the plasticity study. Taking into account twine torsion effects are also potential improvements for better understanding and implementation of netting structures simulation.

Author contribution statement

Dr Benoît VINCENT: Methodology, Equations, Software, Validation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Project administration, Funding acquisition.

Dr Noëlie DI CESARE: Methodology, Software, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing.

Ing. Julien SIMON: Validation.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This study was supported by France Filière Pêche and IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) from the "Fusion-Scotch" support project. The anonymous reviewers are deeply thanked for their comments and suggestions that greatly improved the manuscript.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107166>.

References

- Bessonneau, J.S., Marichal, D., 1998. Study of the dynamics of submerged supple nets (application to trawls). *Ocean Eng.* 25, 563–583.
- De La Prada, A., 2014. Efficient and Accurate Methods for Computational Simulation of Netting Structures with Mesh Resistance to Opening. *Thèse*.
- De La Prada, A., Gonzalez, M., 2015. Quantifying mesh resistance to opening of netting panels: experimental method, regression models, and parameter estimation strategies. *ICES J. Mar. Sci.* 72 (2), 697–707. <https://doi.org/10.1038/278097a0>.
- De La Prada, A., González, M., 2016. Nonlinear stiffness models of a net twine to describe mesh resistance to opening of flexible net structures. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.* 230, 33–44. <https://doi.org/10.1177/1475090214530876>.
- Di Cesare, N., Chamoret, D., Domaszewski, M., 2015. A new hybrid PSO algorithm based on a stochastic Markov chain model. *Adv. Eng. Software* 90, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.08.005>.
- Herrmann, B., Wienbeck, H., Moderhak, W., Stepputtis, D., Krag, L.A., 2013. The influence of twine thickness, twine number and netting orientation on codend selectivity. *Fish. Res.* 145, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.03.002>.
- Kennedy, J., Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, pp. 6556–6559. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091617>.
- Le Bris, F., Marichal, D., 1999. Numerical and experimental study of submerged flexible nets: applications to fish farms. In: *Proc. 1999 Ninth Int. Offshore Polar Eng. Conf. (Volume 3)*, Brest, Fr. 30 May - 4 June 1999, pp. 749–755. <https://doi.org/10.1007/BF02492931>.
- Morvan, B., Priour, D., Guede, Z., Bles, G., 2016. Finite element model for the assessment of the mesh resistance to opening of fishing nets. *Ocean Eng.* 123, 303–313. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.026>.
- Nguyen, T.X., Winger, P.D., 2016. Numerical modeling - a comparison of different methods for simulating bottom trawls. *Fish. Technol.* 53, 9–29.
- Nguyen, T.X., Winger, P.D., Orr, D., Legge, G., Delouche, H., Gardner, A., 2015. Computer simulation and flume tank testing of scale engineering models: how well do these techniques predict full-scale at-sea performance of bottom trawls? *Fish. Res.* 161, 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.08.007>.
- O'Neill, F.G., 2002. Bending of twines and fibres under tension. *J. Text. Inst.* 93, 1–8. <https://doi.org/10.1080/00405000208630548>.
- Prado, J., Dremière, P.Y., 1988. *Guide pratique du marin pêcheur. Tec & Doc. ed.*
- Priour, D., 2001. Introduction of mesh resistance to opening in a triangular element for calculation of nets by the finite element method. *Commun. Numer. Methods Eng.* 17, 229–237. <https://doi.org/10.1002/cnm.398>.
- Priour, D., Cognard, J.-Y., 2011. Investigation of Methods for the Assessment of the Flexural Stiffness of Netting Panels. *DEMaT* 11.
- Reynolds, C.W., 1987. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model. In: *Proc. 14th Annu. Conf. Comput. Graph. Interact. Tech. SIGGRAPH 1987*, vol. 21, pp. 25–34. <https://doi.org/10.1145/37401.37406>.
- Robertson, J.H.B., Stewart, P.A.M., 1988. A comparison of size selection of haddock and whiting by square and diamond mesh codends. *ICES J. Mar. Sci.* 44, 148–161. <https://doi.org/10.1093/icesjms/44.2.148>.
- Sala, A., O'Neill, F.G., Buglioni, G., Lucchetti, A., Palumbo, V., Fryer, R.J., 2007. Experimental method for quantifying resistance to the opening of netting panels. *ICES J. Mar. Sci.* 64, 1573–1578. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm113>.
- Wanchana, W., Kanehiro, H., Inada, H., 2002. Fatigue property of high-performance polyethylene netting twine. *Fish. Sci.* 68, 371–379.