

# projet ENERSENNE

Efficacité énergétique de la senne Danoise

## Rapport final

Projet cofinancé par



Partenariat :



Armement  
« Copropriété Les Barges »  
Les Sables d'Olonne

Projet labellisé



BRETAGNE ATLANTIQUE



**Résumé :**

L'objectif du projet Enersenne est d'une part, d'évaluer la consommation de carburant pour la technique de pêche de la senne danoise et notamment d'évaluer sa répartition dans chacune des étapes de sa mise en œuvre et d'autre part, d'étudier des améliorations potentielles de cette efficacité.

Des capteurs sur le bateau et l'engin ont été installés dans un premier temps. Des mesures ont été faites lors d'essais en mer. Le bateau et l'engin ont été modélisés. De ces mesures et simulations, nous observons que la route et la pêche ont des consommations proches (58% et 42%). Lors de la pêche, l'engin concentre la part principale de la consommation (60%). Cette énergie est transmise pour les 2/3 par les treuils et pour 1/3 par la propulsion.

Des pistes d'améliorations ont été évaluées : Changement de type de treuil (d'hydraulique à électrique), adaptation de la vitesse route à la vitesse optimale, consommation à vitesse nulle, changements de maillette, arrêt de la propulsion lorsque les maillettes sont jointives et donc supposées sans efficacité sur la pêche.

**Abstract :**

The objective of the project is firstly, to assess the fuel consumption for the fishing technique of Danish seine including assessing its distribution in each phase of its implementation and secondly, investigate potential improvements in energy consumption.

Sensors on the boat and on the gear have been installed. Measurements were carried out during sea trials. The boat and gear were simulated. From these measurements and simulations, we observe that the route and fishing phase have more or less the same consumption (58% and 42%). During fishing phase, the gear focuses the main share of consumption (60%). This energy is transmitted to 2/3 by winches and 1/3 by the propulsion.

Areas for improvement were evaluated: Changing the type of winch (electric vs hydraulic), speed adaptation drive at the optimum speed, zero speed consumption, cables modification, stopping the boat when cables are contiguous and therefore assumed ineffective on fishing.

**Mots-clés :** Efficacité énergétique, senne danoise, pêche.

**Keywords:** Energy efficiency, danish seine, fishing.

**Commentaire :**

## Table des matières

<b>1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Partenaires .....</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Déroulement du projet .....</b>	<b>5</b>
<b>4.</b>	<b>Les équipements pour les essais.....</b>	<b>6</b>
4.1.	Pour le bateau (Figure 1) : .....	6
4.2.	Pour la senne (Figure 4) : .....	7
<b>5.</b>	<b>Les essais en Avril 2014.....</b>	<b>8</b>
5.1.	Parcours GPS .....	9
5.2.	Puissances consommées.....	10
5.3.	Tensions de maillettes et de bras .....	11
5.4.	Profondeurs atteintes .....	11
<b>6.</b>	<b>Validation des données des essais .....</b>	<b>12</b>
<b>7.</b>	<b>Analyse des données de ces essais.....</b>	<b>12</b>
7.1.	En pêche .....	12
7.2.	En route .....	14
<b>8.</b>	<b>Modélisation du bateau, de l'engin et de sa mise en œuvre</b>	<b>14</b>
8.1.	Modélisation du navire .....	15
8.1.1.	Modèle de la coque .....	15
8.1.2.	Résistance à l'avancement .....	16
8.1.3.	L'hélice du navire .....	18
8.2.	Modélisation de l'engin et de son virage.....	19
8.2.1.	Modélisation de l'immersion.....	20
8.2.2.	Modélisation des trajectoires .....	21
8.2.3.	Modélisation moyenne.....	22
8.2.4.	Puissances absorbées et transmises.....	28
8.2.5.	Répartition de l'énergie de virage .....	29
<b>9.</b>	<b>Analyse des résultats.....</b>	<b>30</b>
9.1.	Analyse en route libre .....	30
9.2.	Analyse en action de pêche.....	31
<b>10.</b>	<b>Aspects économiques et halieutiques.....</b>	<b>32</b>
<b>11.</b>	<b>Pistes d'améliorations .....</b>	<b>33</b>
11.1.	L'économètre.....	33
11.2.	Rendement des treuils.....	34
11.3.	Vitesse de route .....	34

11.4.	Ligne d'arbre et hélice.....	35
11.5.	La maillette .....	35
11.5.1.	Une maillette plus légère.....	35
11.5.2.	Une maillette de plus petit diamètre .....	35
11.6.	La mise en oeuvre.....	36
11.7.	Synthèse des pistes d'amélioration .....	36
<b>12.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>37</b>

## 1. Introduction

L'augmentation du prix des carburants n'est pas sans conséquence sur l'activité économique des entreprises de pêche qui doivent aujourd'hui trouver des solutions pour consommer moins d'énergie. La technique de la senne danoise connaît dans ce contexte un regain d'intérêt. L'engin de pêche est constitué d'un chalut de petite dimension relié au navire par deux longs câbles appelés maillettes.

L'objectif du projet Enersenne est d'optimiser la consommation de carburant pour la technique de pêche de la senne danoise à partir d'une évaluation de la consommation de carburant de chacune des étapes de mise en œuvre de cette technique. Deux étapes principales sont distinguées :

- La route, pour aller et venir du port à la zone de pêche et pour changer de zones de pêche,
- Les traits, ou opérations de pêche à proprement parlé. Ces traits se décomposent en filage des maillettes et du chalut, et en virage des maillettes et du chalut.

Ce projet a fait l'objet de notes d'avancement en novembre 2013 (Ref : REM/RDT/LCSM/13-108-DP) et en juin 2014 (Ref : RDT/LCSM/R14LCSM316/DP).

Le rapport final reprend l'ensemble des informations obtenues sur l'étude qui s'est déroulée durant deux ans et qui a impliqué des essais en mer avec un armement.

## 2. Partenaires

Le partenariat comprend deux instituts académiques, un armement de pêche et une entreprise spécialisée dans les capteurs et dans le développement d'un économètre.

- Ifremer, centre de Bretagne,
- Armement les Barges des Sables d'Olonne,
- Marinelec, entreprise quimpéroise,
- Ecole Navale, à Brest.

Ce projet collaboratif est financé d'une part par FFP et d'autre part par les partenaires.

Ce projet a été labellisé par le Pôle Mer Bretagne Atlantique le 29/06/2012.

## 3. Déroulement du projet

Le projet s'est déroulé en plusieurs phases :

- Installation du matériel à bord du bateau Les Barges et sur l'engin pour la mesure lors des essais en mer,
- Essais en mer pendant 2 semaines en avril 2014,
- Modélisation du bateau et de l'engin,
- Analyse des essais et des simulations pour en extraire l'évaluation énergétique de cette technique de pêche.

## 4. Les équipements pour les essais

Pour les essais en mer, plusieurs équipements ont été installés sur le bateau et la senne.

### 4.1. Pour le bateau (Figure 1) :

- Capteur de couple sur l'arbre hélice (Figure 2), pour estimer la puissance nécessaire à la propulsion.
- Débitmètre pour la consommation de carburant (Figure 3).
- Wattmètre pour la production électrique de l'alternateur.
- Capteurs pour la mesure de la consommation des différents postes électriques.
- Capteur pour la mesure de la gîte et l'assiette du bateau.



Figure 1 : Bateau « Les Barges » en mer et à quai.



Figure 2 : Torsio-mètre (bleu) sur l'arbre hélice.



Figure 3 : Ecran de contrôle des enregistrements du débitmètre de carburant, du couplemètre, des vitesses de treuils et capteurs électriques.

#### 4.2. Pour la senne (Figure 4) :

- Tensiomètre sur les 4 bras des pointes d'ailes, pour estimer les tensions dans les bras (Figure 5).
- Profondimètres sur la corde de dos (Figure 6) et le bourrelet (Figure 7) pour évaluer la vitesse de descente du chalut et son ouverture verticale.

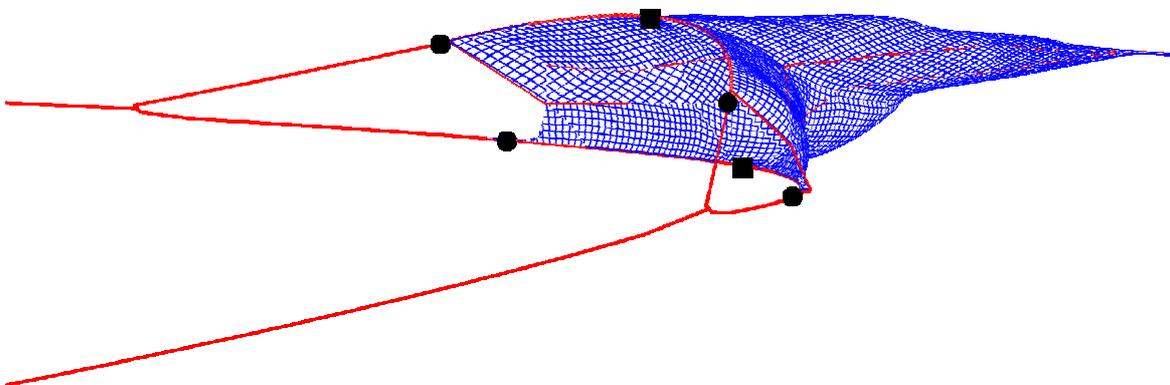


Figure 4 : Représentation du filet et d'une partie des maillettes. Les 4 capteurs de tension (ronds) sont placés aux 4 pointes d'ailes supérieures et inférieures. Les 2 capteurs de pression (carrés) sont placés sur la corde de dos et le bourrelet.

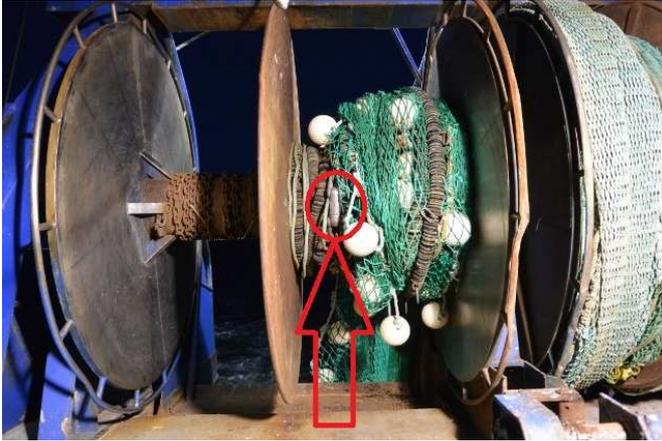


Figure 5 : Tensiomètre fixé sur un des 4 bras.



Figure 6 : Corde de dos.

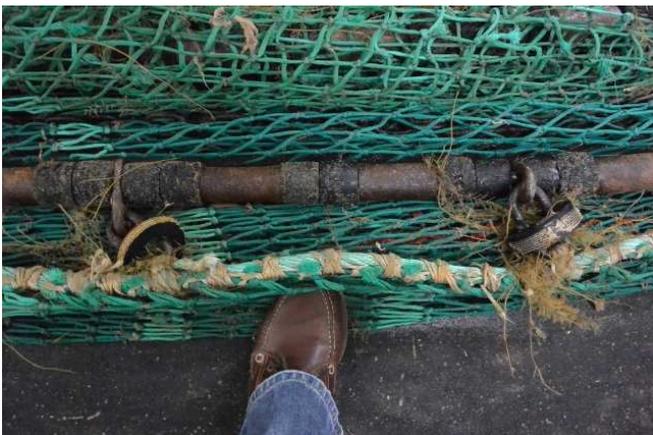


Figure 7 : Bourrelet fixé au filet.

## 5. Les essais en Avril 2014

Les essais ont été réalisés pendant 2 semaines en Avril 2014. Lors de ces essais, 48 traits ont été réalisés. Chaque opération de pêche consistait en un filage des maillettes (2 fois 2500 m) et du chalut selon un carré d'environ 1,25 km de côté puis en un virage de l'engin de pêche.

Les essais au point fixe n'ont pas été réalisés. La mesure de la puissance consommée par les treuils n'a pas été enregistrée.

Les 48 traits sont visibles sur la Figure 8 où la longueur des maillettes est représentée en fonction du temps : les longueurs varient bien de 0 à 2500m pour chaque maillette.

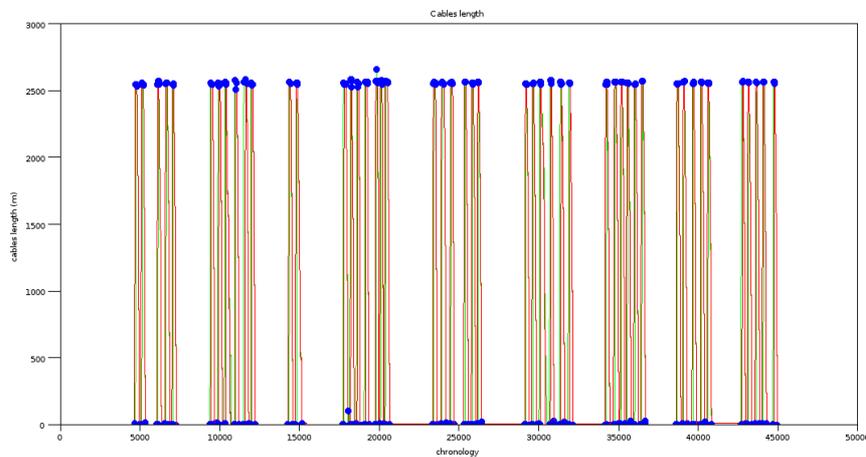


Figure 8 : Mesure des longueurs filées de maillettes (rouge pour bâbord et vert pour tribord). La chronologie est représentée horizontalement.

Les résultats classiques de ces mesures sont dans les Figure 9 à Figure 12.

## 5.1. Parcours GPS

La Figure 9 représente le parcours du bateau lors du trait 6. Le nord est orienté vers le haut. La forme carrée correspond au déploiement des deux maillettes et du chalut : plus précisément, le déploiement de la maillette tribord entre les deux points verts, le déploiement du chalut entre le point vert et le rouge, le déploiement de la seconde maillette entre les deux points rouges. Après les déploiements, le bateau se déplace vers le nord-ouest et le virage des maillettes s'opère entre les deux derniers points verts.

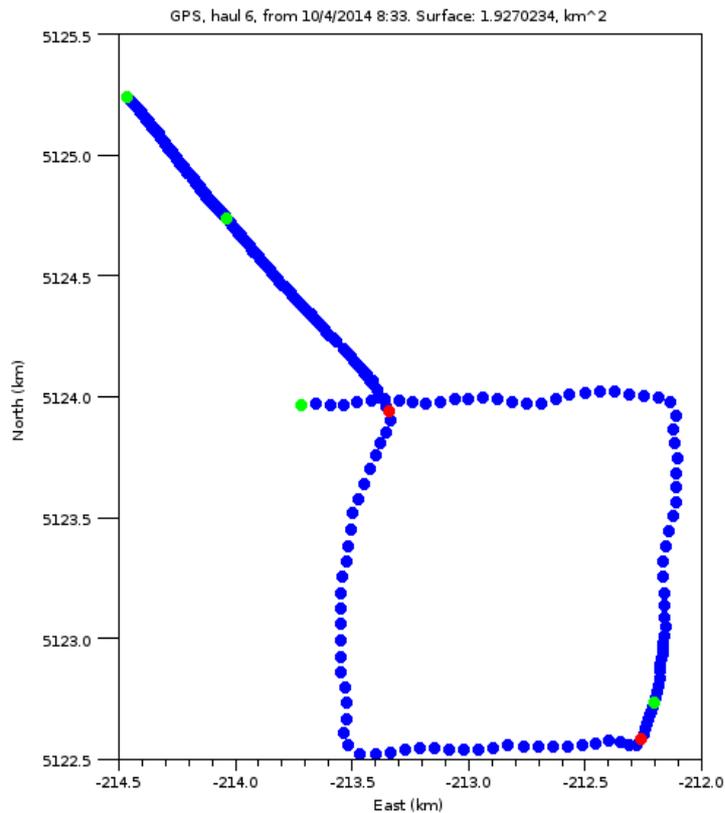


Figure 9 : Parcours du bateau lors du trait 6.

## 5.2. Puissances consommées

La Figure 10 représente les puissances consommées lors du trait 6 en fonction du temps en minute. Le temps 0' correspond au début du filage de la première maillette. Le premier trait vertical (vert à 13') correspond à la fin du filage de la première maillette. Le second trait vertical (rouge 16') correspond au début du filage de la seconde maillette. Le troisième trait vertical (rouge 27') correspond à la fin du filage de la deuxième maillette. Le quatrième trait vertical (vert 44') correspond au début du virage des maillettes. Le dernier trait vertical (vert 76') correspond à la fin du virage. On remarque les consommations élevées (courbes bleu foncé) lors des filages liés aux vitesses élevées du bateau et lors du virage liées au fonctionnement des enrouleurs. La puissance de consommation est le débit en l/h multiplié par 10KWh/l, énergie moyenne par litre de gas-oil.

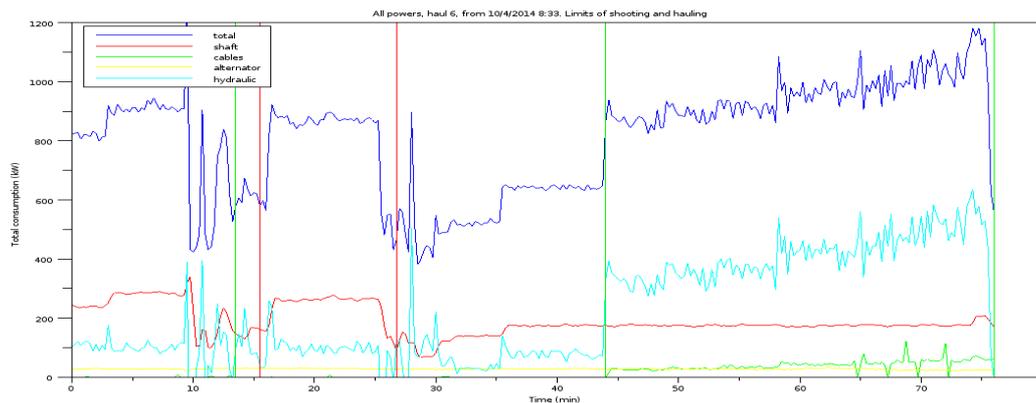


Figure 10 : Puissances consommées lors du trait 6 en fonction du temps en minute.

### 5.3. Tensions de maillettes et de bras

La Figure 11 représente les tensions dans les maillettes au niveau des treuils (rouge) et des pointes d'ailes inférieures (vert) et supérieur (bleu). On note à la fin du filage de la première maillette (de 10' à 15') une tension aux pointes d'ailes liée à la mise à l'eau du chalut. Entre la fin du filage et le début du virage (de 30' à 44') les tensions sont liées à la vitesse d'avance du bateau. L'augmentation brutale de tension dans les maillettes à 44' est due au début du virage des maillettes. Lors du virage des maillettes (de 44' à 76') il y a une diminution de la tension des maillettes et une augmentation des tensions des pointes d'ailes liée à l'augmentation de traînée du filet due à l'augmentation de vitesse de virage.

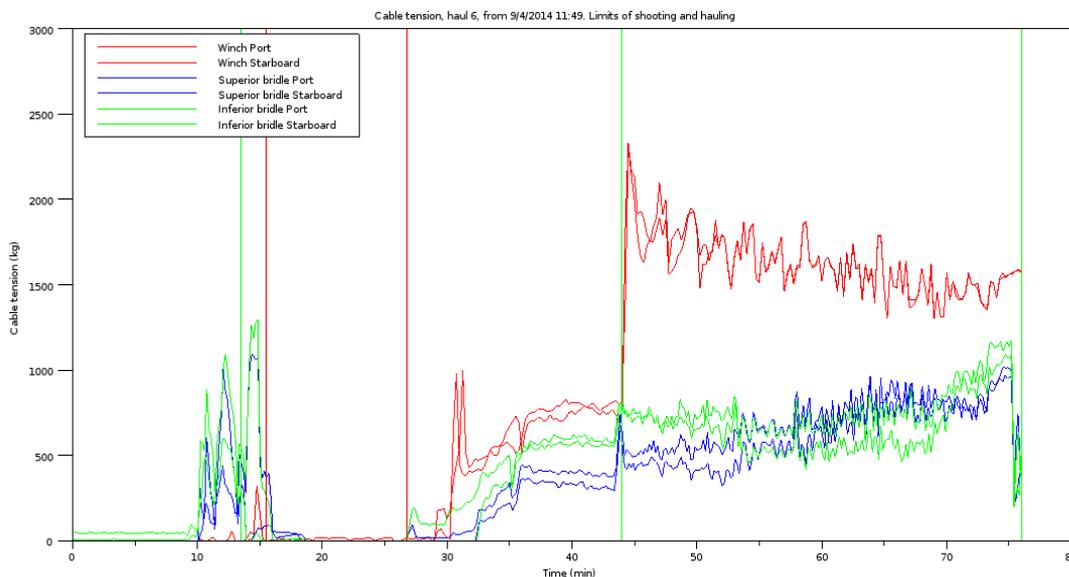


Figure 11 : Tensions dans les maillettes au niveau des treuils (rouge) et des pointes d'ailes (vert et bleu) lors du trait 6.

### 5.4. Profondeurs atteintes

La Figure 12 représente les profondeurs du bourrelet (rouge) et de la corde de dos (bleu). On note que la profondeur lors de ce trait est de 110m. La chute du chalut a lieu entre 15' et 20', elle dure donc 5' pour 110m de profondeur. La remontée qui a lieu entre 71' et 76' dure donc aussi 5'. Lorsque le chalut est au repos (pendant le filage de la deuxième maillette entre 20' et 27'), l'ouverture verticale est d'environ 18m. Dès que le bateau

commence à avancer (28' à 32') après le filage de la deuxième maillette, l'ouverture diminue légèrement (14m) ; ensuite l'ouverture verticale est de l'ordre de 4m seulement lors du virage des maillettes (de 37' à 71').

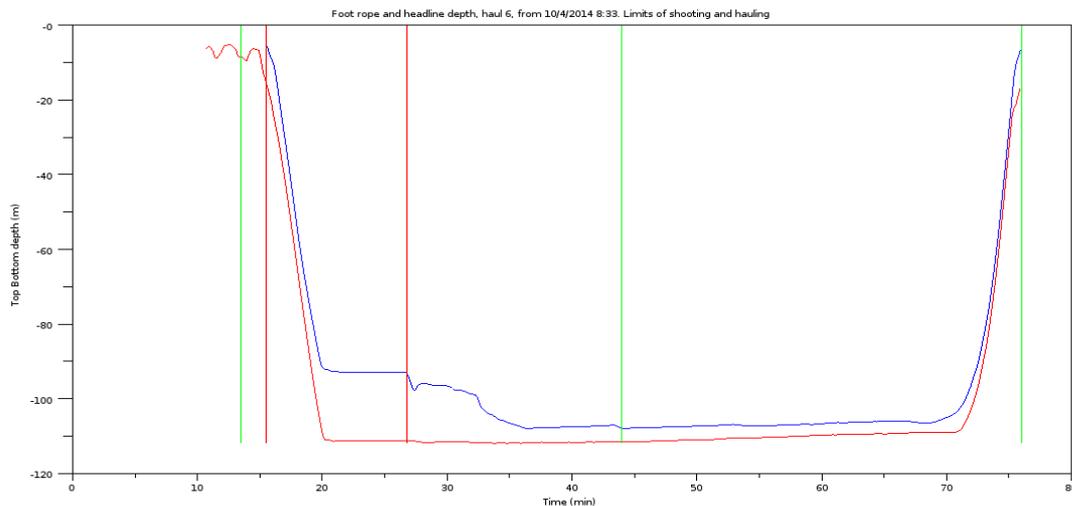


Figure 12 : Profondeurs du bourrelet (rouge) et de la corde de dos (bleu) lors du trait 6.

## 6. Validation des données des essais

Certaines mesures ne sont pas valides :

- La vitesse du bateau donnée par le GPS n'est pas toujours valide ; aussi elle est recalculée à partir des positions GPS.
- La position GPS n'est pas toujours mesurée, aussi certains traits ne sont pas exploités.
- Les puissances sur la ligne d'arbre estimées à grande vitesse (> 8 kt) ne semble pas cohérentes et font penser à une saturation du capteur.

## 7. Analyse des données de ces essais

A partir de ces mesures nous estimons quelques paramètres donnés dans les Figure 13 à Figure 16.

### 7.1. En pêche

La Figure 13 donne la surface moyenne balayée par les maillettes. Elle est de l'ordre de 2 km<sup>2</sup> (entre 1.5 km<sup>2</sup> et 2.5 km<sup>2</sup>) et est réalisée en moins de 1h30. Les valeurs inférieures à 1.5 km<sup>2</sup> ne sont pas valides. Nous rappelons que, lors d'un projet antérieur réalisé sur un bateau équivalent au navire Les Barges mais équipé d'un chalut de fond, nous avons mesuré que chaque trait opérait une surface d'environ 1 km<sup>2</sup> (16 km par 65 m entre les panneaux) en 3 heures de temps.

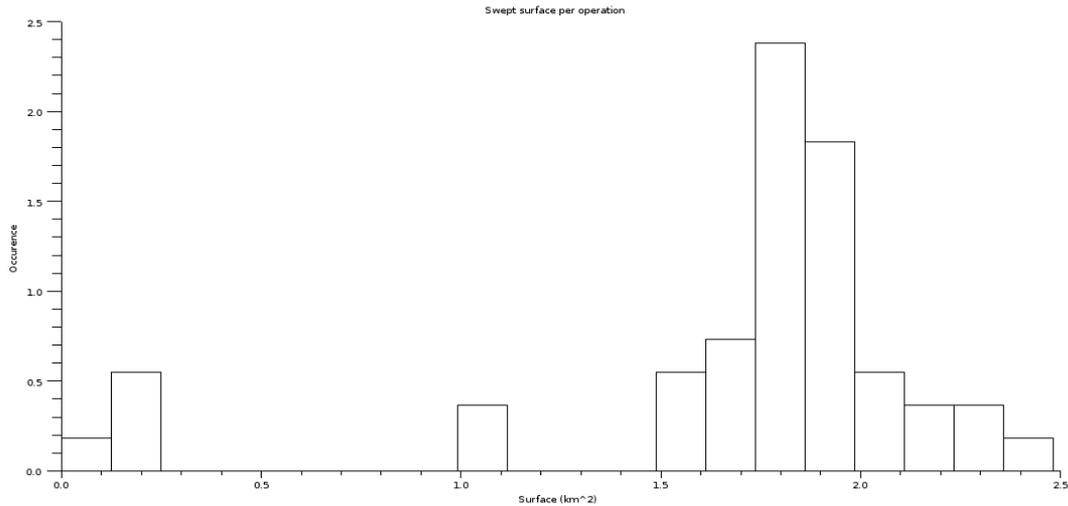


Figure 13 : Surface moyenne balayée par les mailletes (entre 1.5 km<sup>2</sup> et 2.5 km<sup>2</sup>). Les valeurs inférieures à 1.5 km<sup>2</sup> ne sont pas valides.

En totalité, le trait nécessite environ 108 litres de gas-oil. La répartition de cette consommation moyenne de carburant pendant les traits est donnée dans la Figure 14. Le filage de la première maillette nécessite environ 20 l de fuel (en noir). Le filage du chalut environ 5 l (bleu foncé). Le filage de la deuxième maillette 18 l (vert). La récupération de la bouée et le début du remorquage de l'engin moins de 10 l (bleu clair). Le virage environ 50 à 60 l (rouge).

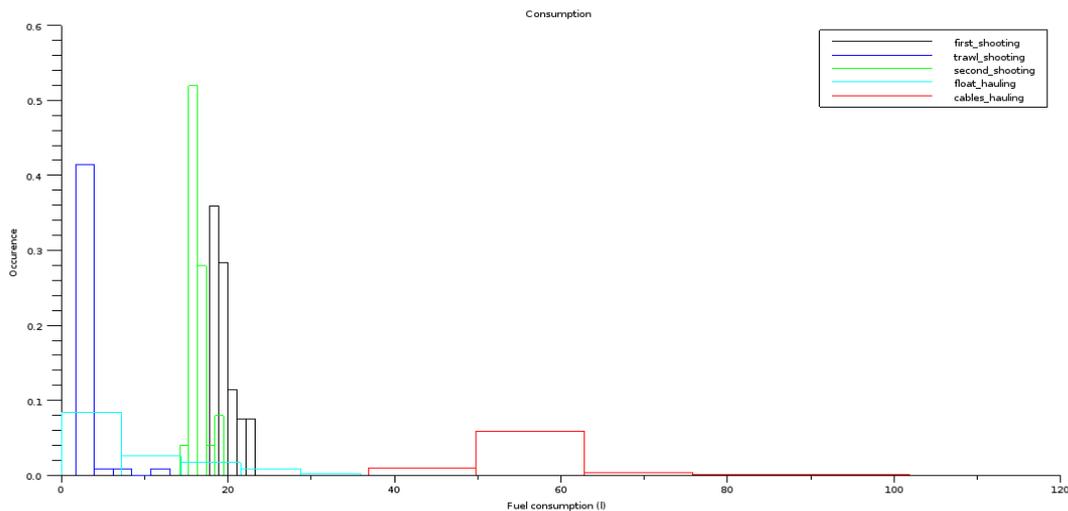


Figure 14 : Répartition des consommations par opération.

Nous en déduisons que la consommation nécessaire pour balayer 1 km<sup>2</sup> est de 50 à 60 l (Figure 15). Nous rappelons que pour un chalut de fond il faut de l'ordre de 300 l pour balayer 1 km<sup>2</sup>.

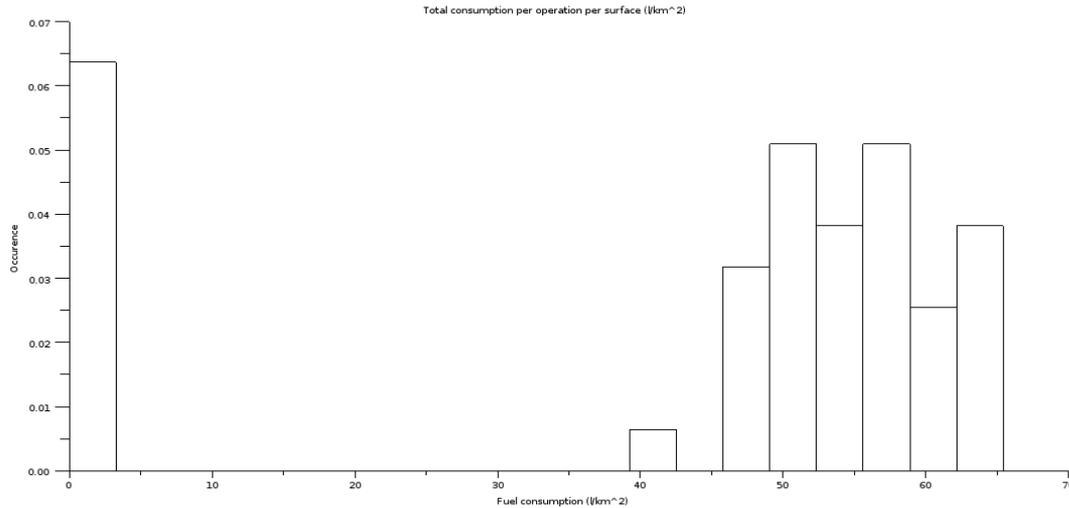


Figure 15 : Consommation nécessaire pour balayer 1 km<sup>2</sup>.

## 7.2. En route

Pour la route (hors opérations de pêche) la consommation de fuel par mille parcouru dépend grandement de la vitesse du bateau (Figure 16). L'optimum est de 7 à 8 l par mille parcouru, il est obtenu à environ 7 nœuds de vitesse. Il est à noter que les conditions environnementales (vent, courant et houle) ne sont pas mesurées et provoquent une dispersion des mesures notamment à grandes vitesses.

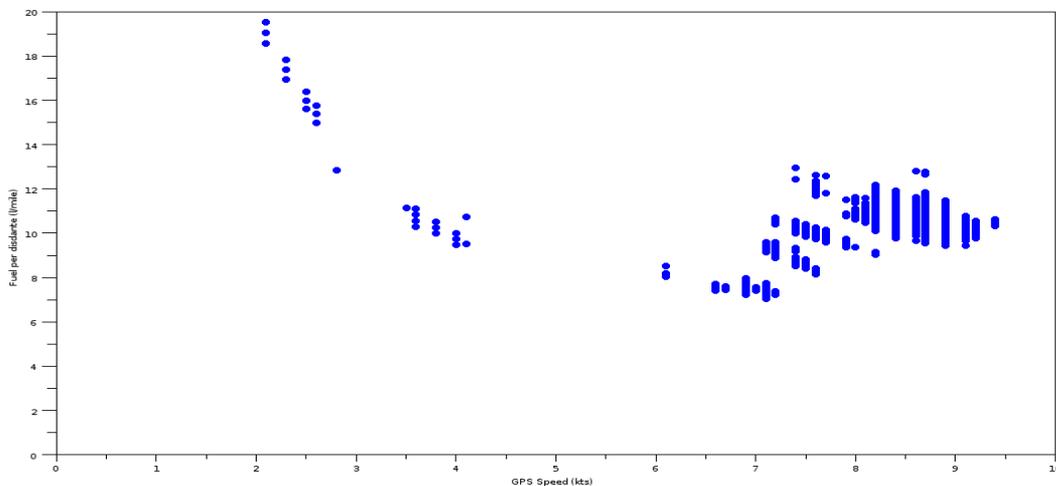


Figure 16 : Consommation de fuel par mille parcouru pendant la route.

## 8. Modélisation du bateau, de l'engin et de sa mise en œuvre

La modélisation permet d'extraire des mesures réalisées certaines informations inaccessibles par la mesure :

- La puissance absorbée par l'arbre hélice à vitesse d'avance nulle,
- La puissance nécessaire à la traînée de la maillette sur le fond,
- Les puissances nécessaires aux traînées hydrodynamiques des maillettes et du chalut.

## 8.1. Modélisation du navire

### 8.1.1. Modèle de la coque

Le dessin de coque a été fourni par l'architecte sous forme du dessin de 21 couples. Une saisie manuelle de ces informations a été réalisée pour obtenir le dessin de la coque en 3D (figure 17).

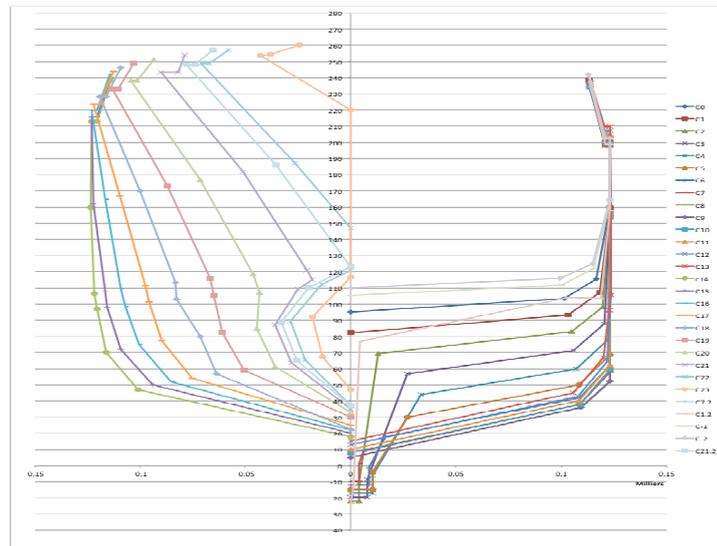


Figure 17 : Plan des couples sous Excel

Ces données ont été exportées vers un modéleur graphique permettant le lissage de la géométrie et le contrôle complet de la forme représenté figure 18.

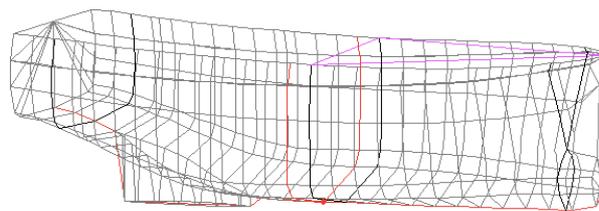


Figure 18 : Visualisation de la coque sous type fil de fer

A partir de cette géométrie extérieure les ponts et cloisons ont été définis conformément au manuel de sécurité fourni par le bord afin de définir le volume étanche représenté sur la Figure 19.

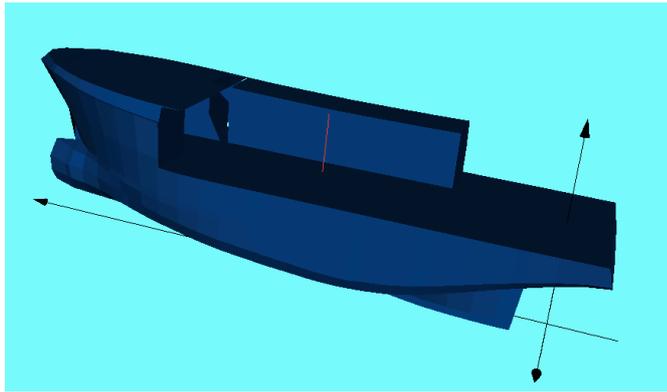


Figure 19 : Visualisation du volume étanche

Les données massiques du bâtiment ont été relevées dans le manuel de stabilité qui décrit le déplacement et la position du centre de gravité pour différents cas de chargement réglementaires. Le modèle peut être considéré comme étant géométriquement conforme au navire réel lorsque les courbes de stabilité calculées à partir de la modélisation informatique sont quasiment identiques aux courbes données par le constructeur dans le dossier de stabilité du chalutier. L'ajustement du volume étanche a permis d'obtenir les courbes de stabilité en fonction de l'angle de gîte pour les différents cas de chargement du chalutier. Un exemple de ces courbes, pour le premier cas de chargement du manuel de stabilité du navire, est donné figure 20.

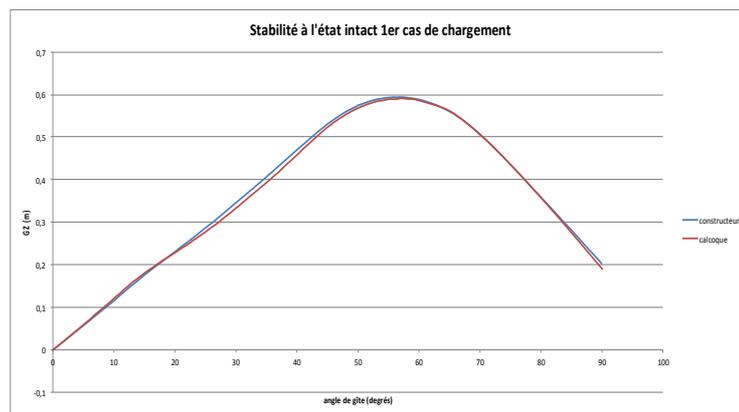


Figure 20 : Comparaison des courbes de stabilité cas de chargement n-1 du manuel de stabilité du navire.

Les courbes de stabilité sont sensiblement identiques à celles obtenues par le constructeur. Les quelques différences observées sont à associer au manque de finesse du maillage. Les écarts maximum mesurés dans ces conditions ne dépassant pas 0,64% ; le modèle de coque est donc satisfaisant pour permettre l'évaluation de la résistance à l'avancement du chalutier.

### 8.1.2. Résistance à l'avancement

Dans cette étude, seule la résistance hydrodynamique a été retenue dans la mesure où les effets liés à la résistance aérodynamique des superstructures ne pouvaient pas être pris en compte en raison de l'absence de données. Nous précisons que le dernier carénage date de juillet 2013. Cette résistance par ailleurs ne représente que 2-3 % de la résistance globale dans le cas le plus défavorable. Notons que le dernier carénage date de 9 mois. La résistance hydrodynamique se compose de la résistance de vague ( $R_w$ ), de

la résistance visqueuse ( $R_v$ ) et la résistance d'appendices qui ne sera pas prise en compte ici et qui représente également 3-4 % de la résistance totale d'une carène.

$$R_t(v) = R_v + R_w$$

La résistance visqueuse est la même que celle s'exerçant sur une plaque plane parallèlement à l'écoulement et corrigée d'un facteur de forme propre à la coque :

$$R_v = (1 + \varphi) R_f$$

Avec  $(1 + \varphi)$  le facteur de forme et  $R_f$  la résistance de frottement donnée par la formule ITTC 57 :

$$R_f = \frac{1}{2} C_f \rho S V^2 \quad \text{et} \quad C_f = \frac{0.075}{[\log_{10} Re_L - 2]^2}$$

Le facteur de forme est donné par des essais à petites vitesses pour lesquelles la résistance hydrodynamique tend vers la résistance visqueuse.

La puissance effective pour assurer la propulsion est donnée par :

$$P_e = v R_t(v) \quad (1)$$

La puissance sur l'arbre (fournie à l'hélice) est donnée par :

$$P_a = 2\pi N Q$$

Où  $N$  est la vitesse de rotation de l'hélice et  $Q$  le couple appliqué. Cette valeur correspond à la mesure de puissance sur l'arbre réalisée à bord. On a :

$$P_e = \eta_g P_a$$

$\eta_g$  est le rendement global qui dépend du rendement de l'hélice en eau libre et des interactions entre l'hélice et la carène. Il vaut généralement entre 0,4 et 0.5. Les calculs réalisés permettent d'obtenir la valeur de  $R_t(v)$ . En comparant  $P_e$ , estimé par le calcul et  $P_a$ , mesuré à bord on en déduit, pour les conditions de route libre, la valeur de  $\eta_g$ .

Le calcul de  $R_t$  a été réalisé en utilisant le modèle de carène précédemment vérifié et un logiciel de calcul de résistance.

La courbe de la Figure 21 présente la résistance de la carène nue ainsi déterminée.

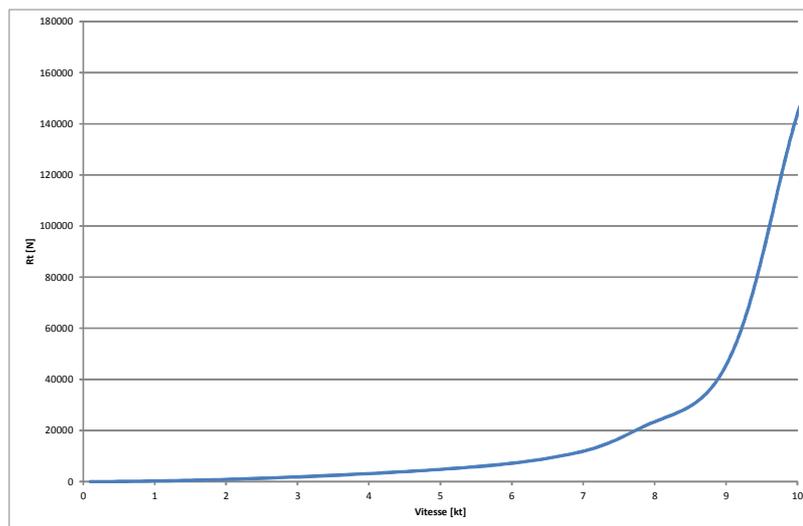


Figure 21 : Résistance à l'avancement de la carène seule.

Ce calcul permet la détermination de la puissance nécessaire à entraîner la carène par (1). Cette puissance, représentée sur la figure 22, peut être comparée à la puissance mesurée en route libre sur l'arbre. Ce travail sera réalisé dans la section 5.

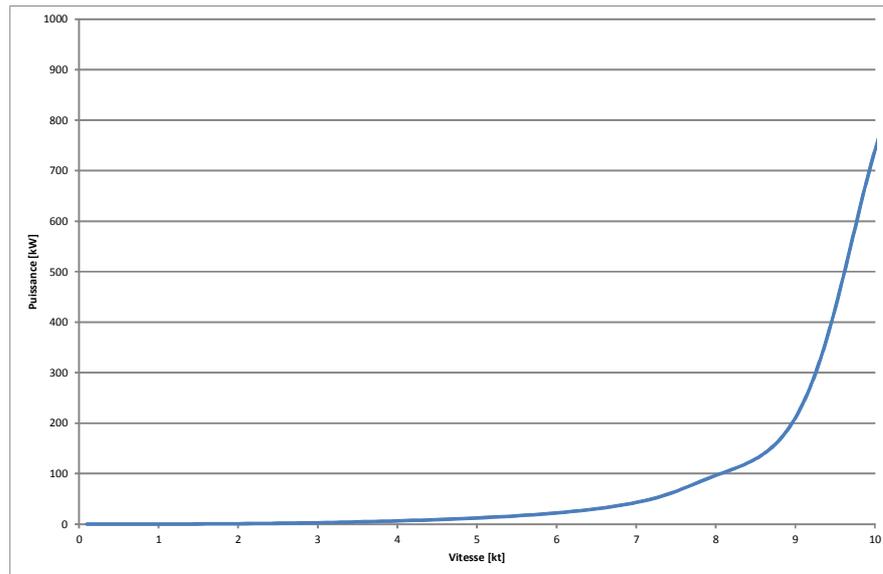


Figure 22 : Puissance propulsive  $P_e$

### 8.1.3. L'hélice du navire

Sans données géométriques précises sur le propulseur il n'est pas possible de réaliser des calculs concernant le système propulsif en lui-même. Cependant il est intéressant de montrer que le propulseur se trouve dans des conditions défavorables lorsque le bateau est dans une situation de pêche. Le schéma de la Figure 23 montre les courbes hélices telles qu'elles se présentent classiquement.

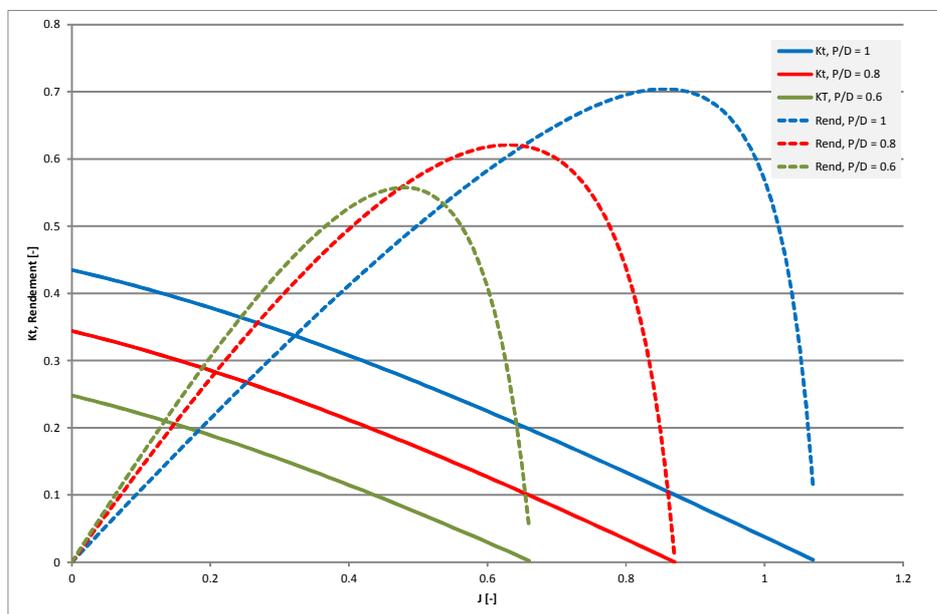


Figure 23 : Schéma classique présentant les courbes d'une hélice en eau libre.

Le paramètre  $J$ , paramètre d'avance est égal à  $J = \frac{v}{nD}$  où  $n$  est la vitesse de rotation du propulseur,  $v$  la vitesse d'avance de l'hélice et  $D$  son diamètre. Si le navire doit fournir une poussée importante à vitesse faible (cas où le navire tracte à faible vitesse son chalut) la vitesse de rotation de l'hélice étant constante le paramètre d'avance diminue et le rendement de l'hélice décroît fortement. Le pas de l'hélice est cependant souvent plus

faible dans ces conditions (hélices à pales orientables) ce qui compense en partie la diminution de rendement qui reste cependant importante.

Une étude approfondie du propulseur permettrait probablement des gains en rendement substantiels en particulier durant les opérations de pêche. Dans le travail présenté ici les effets du rendement de l'hélice ne peuvent être qu'estimés. On retiendra un rendement global de propulsion de 50 % environ en route libre et de l'ordre de 30 % pour les conditions à faible vitesse pendant les actions de pêche.

Des données complémentaires seront disponibles dans le rapport final du projet OPTIPROP financé par la DPMA.

## 8.2. Modélisation de l'engin et de son virage

La modélisation de l'engin est précisée dans les figures suivantes. Les caractéristiques principales sont :

- 2 Maillettes : chacune de longueur 2500 m, diamètre 36 mm, masse volumique  $1374 \text{ kg/m}^3$ .
- Filet : surface de fils  $228 \text{ m}^2$ .

La Figure 24 est le plan du chalut et des câbles, maillettes comprises.

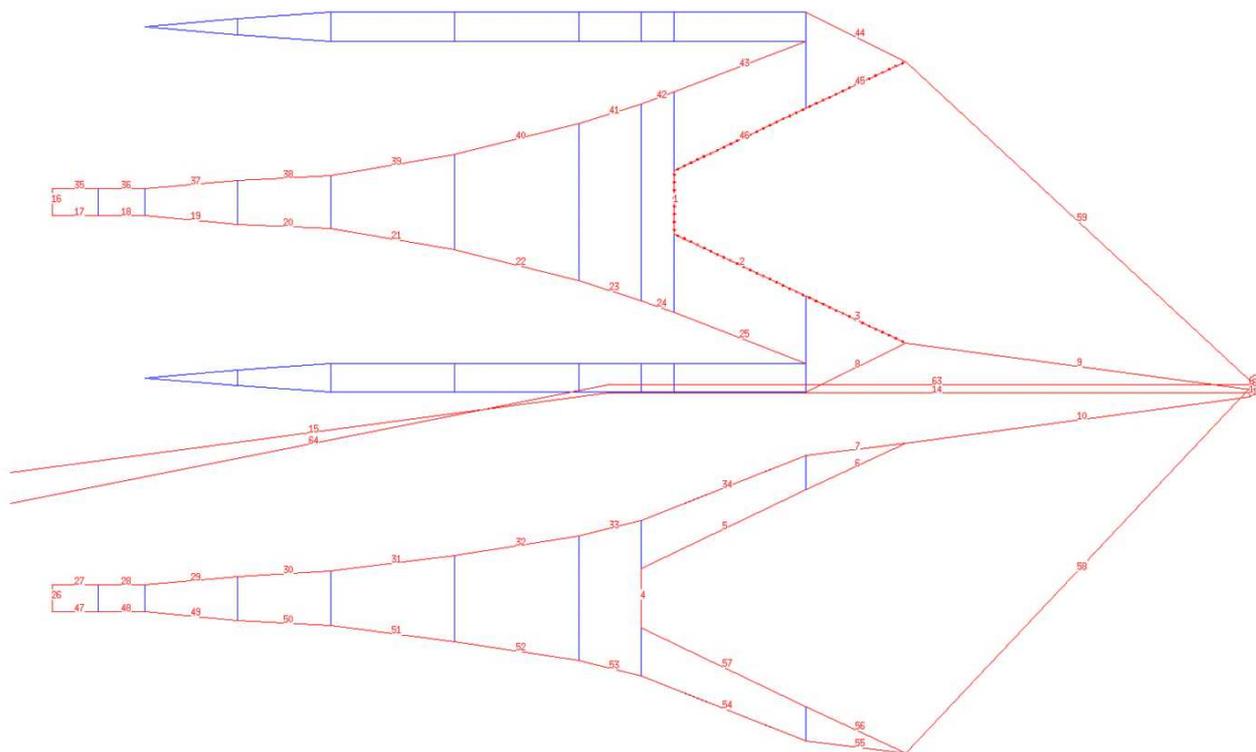


Figure 24 : Le plan de la senne : en bleu le filet et en rouge les câbles, maillettes et ralinges.

La forme initiale des maillettes avant le virage est donnée dans la Figure 25.

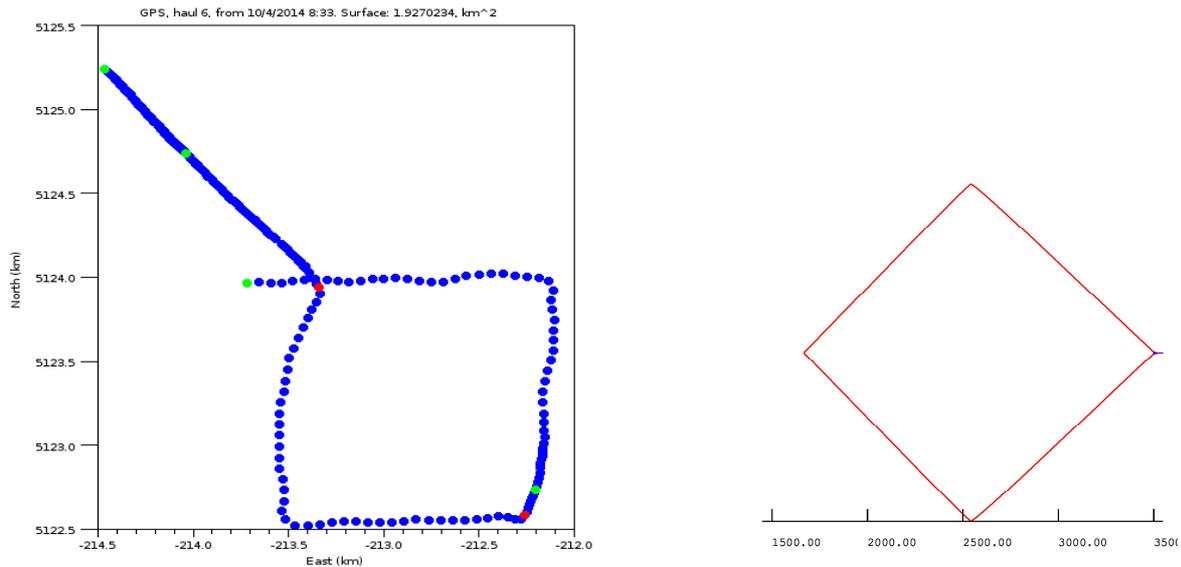


Figure 25 : Trace GPS mesurée à gauche et forme initiale modélisée de la senne et des maillettes à droite. La forme carrée initiale est respectée, bien que tournée de 45°. Sur la simulation le filet est à droite (représenté) et le bateau à gauche (non représenté).

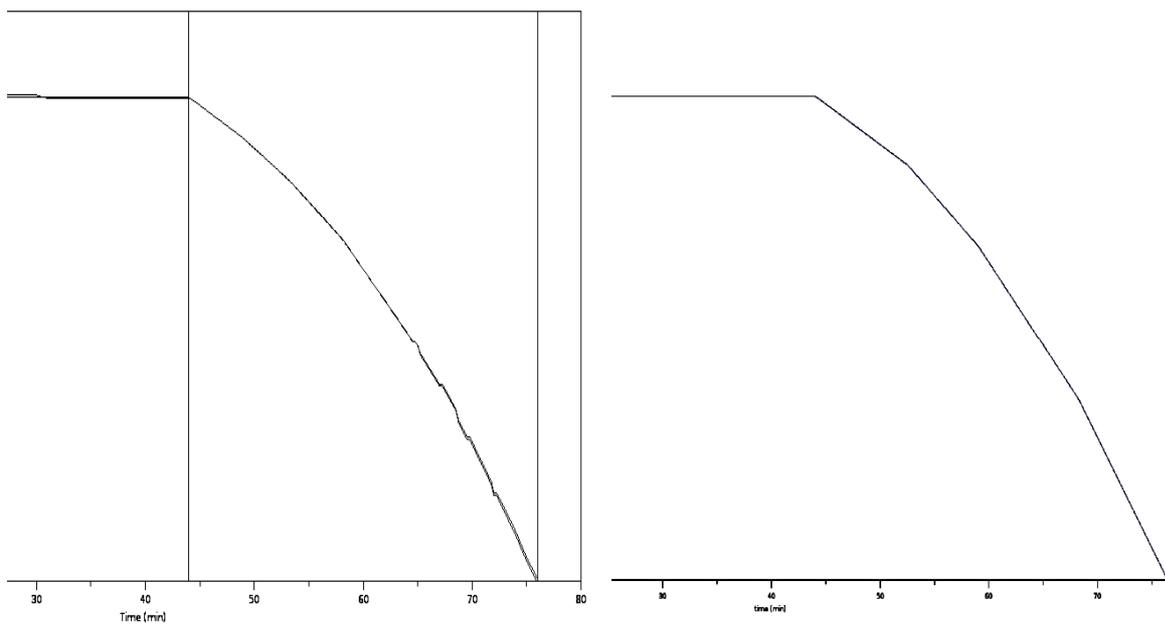


Figure 26 : Longueur de maillette immergée en fonction du temps. La mesure à gauche et le modèle à droite. Les vitesses de virage sont identiques.

### 8.2.1. Modélisation de l'immersion

La mesure de la profondeur du bourrelet et de la corde de dos et sa modélisation est sur la Figure 27. La mesure et la simulation des profondeurs sont équivalentes : l'ouverture verticale au début est élevée puis diminue, le chalut remonte de 110 m en 5'.

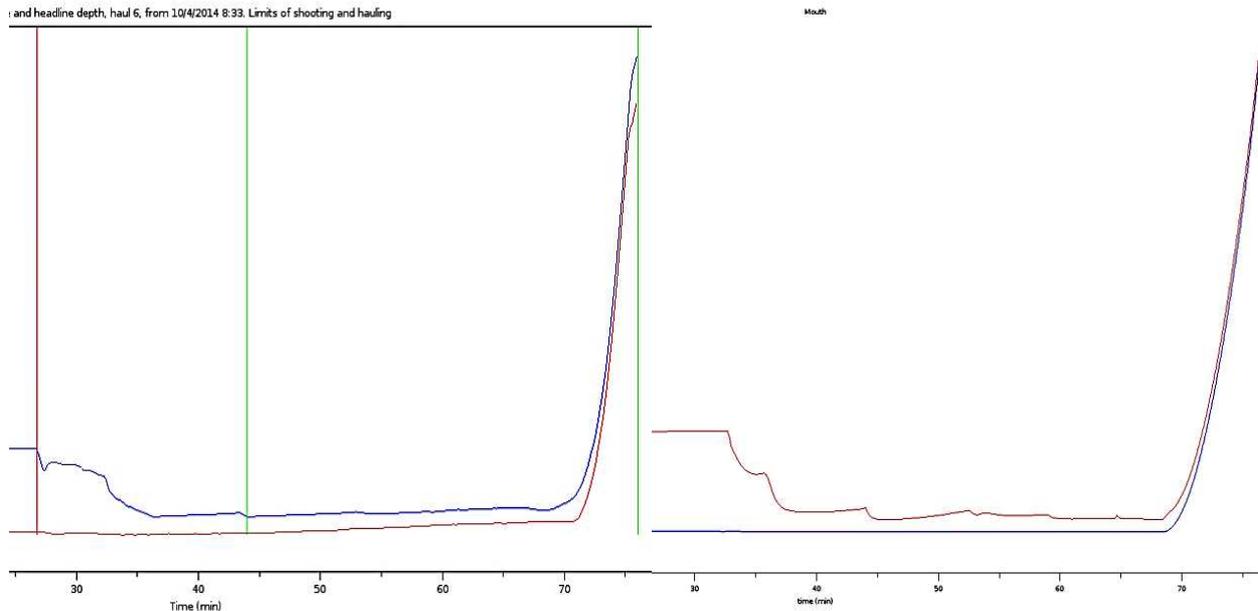


Figure 27 : Profondeur du bourrelet et de la corde de dos : mesure à gauche et modèle à droite.

### 8.2.2. Modélisation des trajectoires

Lors du trait n°13 nous avons mesuré les trajectoires du bateau ainsi que des milieux des maillettes. Pour cela des capteurs GPS ont été placés dans des flotteurs (Figure 28) qui étaient reliés à la maillette par des garcettes de petit diamètre. La longueur des garcettes étaient d'environ 3 fois la profondeur (200 m de longueur pour environ 60 m de profondeur).



Figure 28 : Les trajectoires de milieux de maillette ont été mesurées par des capteurs GPS (à gauche) et placées dans des flotteurs reliés aux maillettes par des garcettes (à droite).

La mesure et la simulation de la trajectoire du bateau et de la senne sont comparées sur la Figure 28. Il y a superposition des trajectoires mesurées et simulées du bateau (comme

attendu). Les trajectoires des milieux de maillettes mesurées et simulées coïncident : cela montre la capacité du modèle numérique à simuler le virage de la senne

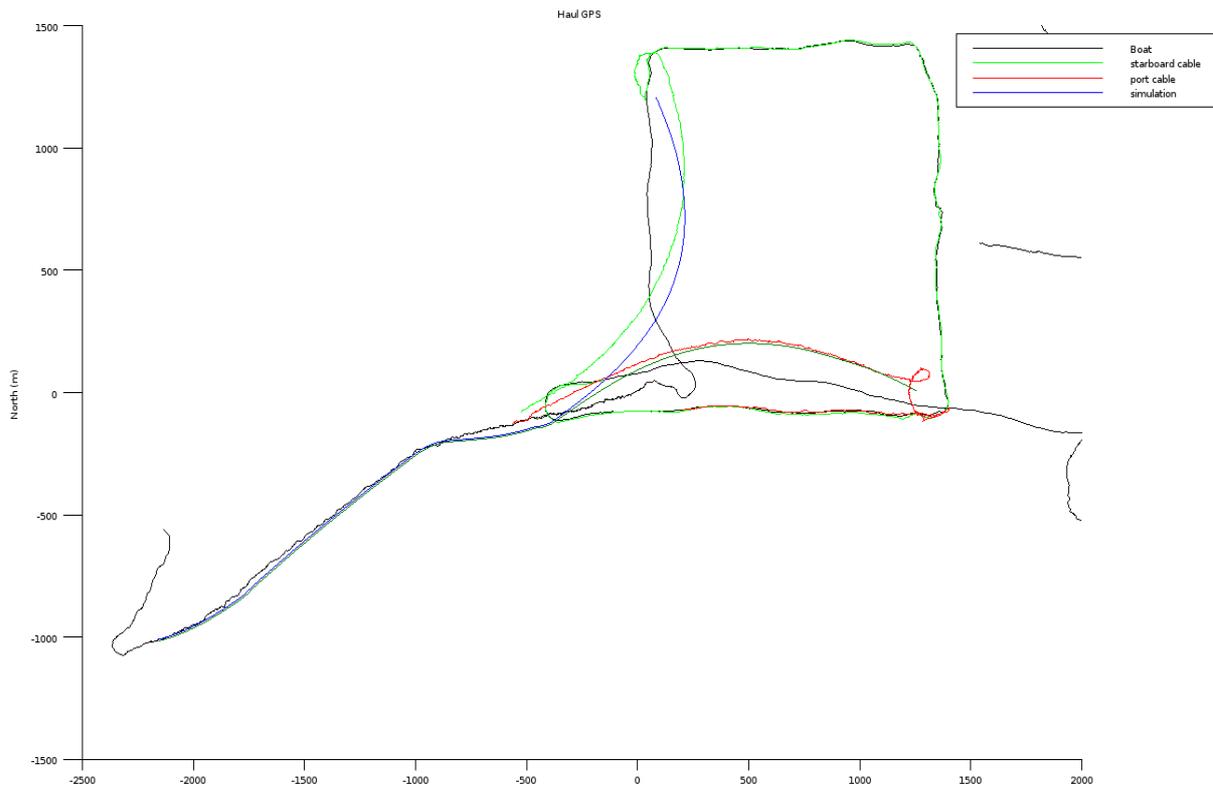


Figure 29 : Mesure et simulation de la trajectoire du bateau et de la senne.

### 8.2.3. Modélisation moyenne

Les modélisations trait par trait ne sont pas satisfaisantes car il existe de nombreuses incertitudes sur les vitesses du bateau et de virage. Aussi nous avons préféré utiliser des vitesses moyennes sur un nombre de traits de bonne qualité (mesures valides, pas d'incidents).

A partir des 48 traits, 14 traits ont donc été extraits compte tenu du bon déroulement de l'opération de pêche (pas d'incidents de manœuvre, de filage ou de virage de maillettes, de capteurs). De ces 14 traits nous avons extrait la vitesse du bateau (Figure 30) ainsi que la vitesse de virage des maillettes (Figure 31).

La mesure de la vitesse du bateau après le filage des maillettes pour les 14 traits sélectionnés est représentée sur la Figure 30. La moyenne et l'écart type sont indiqués par les courbes. La moyenne et l'écart type sont calculés sur 10 plages de temps de même durée centrées sur les points. Les points d'extrémité sont simplement l'extrapolation des 2 points les plus proches. On remarque que le bateau commence vers 2 nœuds pour ralentir à 1 nœud et enfin accélérer à 2 nœuds

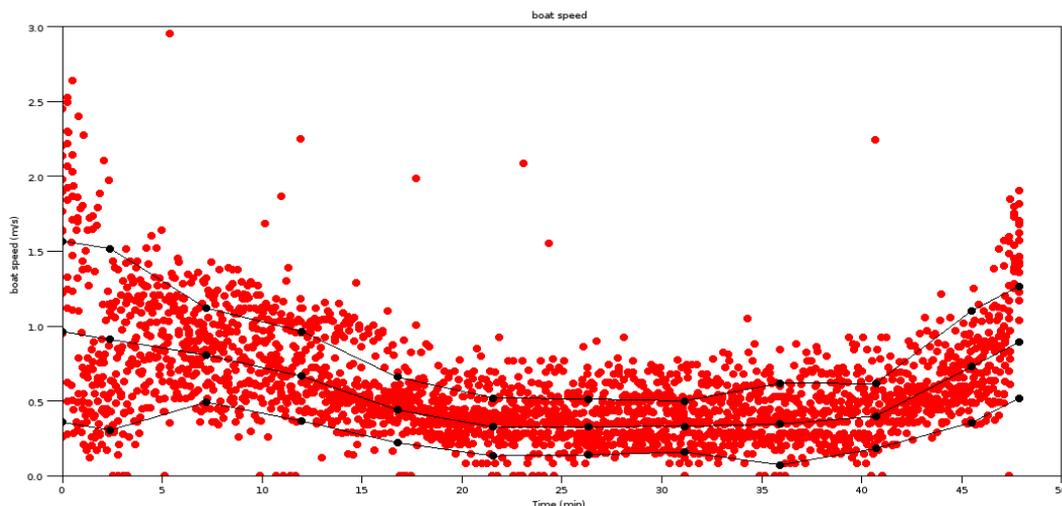


Figure 30 : Mesure de la vitesse du bateau, sa moyenne et son écart type après le filage des maillettes et jusqu'à la fin du virage.

La mesure de la vitesse de virage des maillettes pour les 14 traits sélectionnés est sur la Figure 31, pour les maillettes tribord et bâbord. La moyenne et l'écart type sont indiqués par les courbes. La moyenne et l'écart type sont calculés sur 10 plages de temps de même durée centrées sur les points. Les points d'extrémité sont simplement l'extrapolation des 2 points les plus proches. On remarque que le virage commence lentement pour atteindre environ 4 nœuds

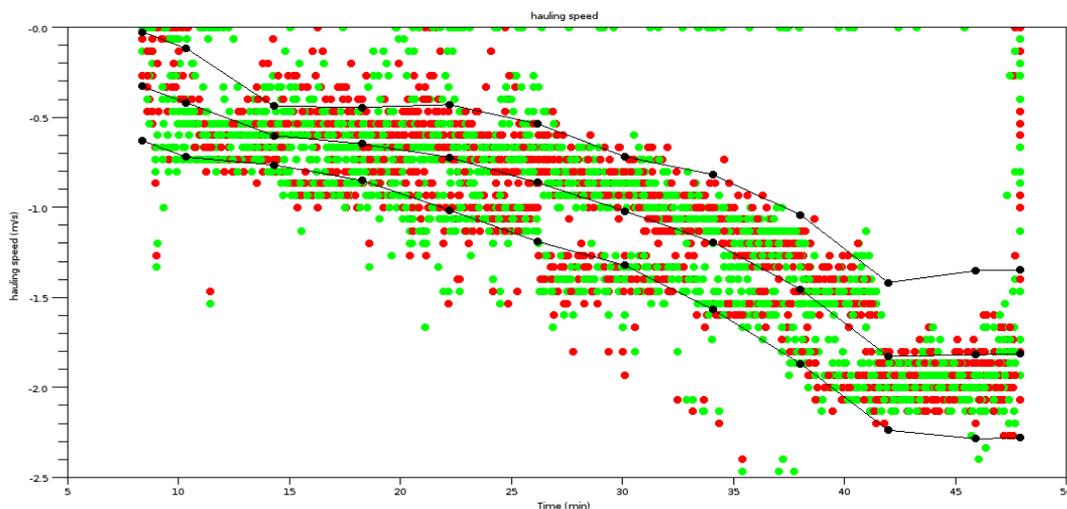


Figure 31 : Mesure de la vitesse de virage, sa moyenne et son écart type.

Ces mesures moyennes sont intégrées dans le modèle numérique. Les figures suivantes (Figure 32 à Figure 34) sont obtenues par le modèle numérique une fois la simulation du virage réalisée.

La mesure et la simulation des tensions de maillettes au treuil, des pointes d'ails inférieures et supérieures sont représentées sur la Figure 32. La mesure reprend l'ensemble des 14 traits sélectionnés. Le temps 0' correspond au début du virage des maillettes. Le début de l'opération (remorquage de l'engin) commence à -8' pour la simulation. Le début des opérations est plus variable pour la mesure. La fin du virage des maillettes est à 39', et la fin de l'opération (remorquage) est à 43'. Les tendances mesurées sont respectées par la simulation. Pour cela il a fallu appliquer un facteur de réduction de la traînée du filet (chalut), qui varie linéairement entre 0 à 22' et 0.5 à 43'.

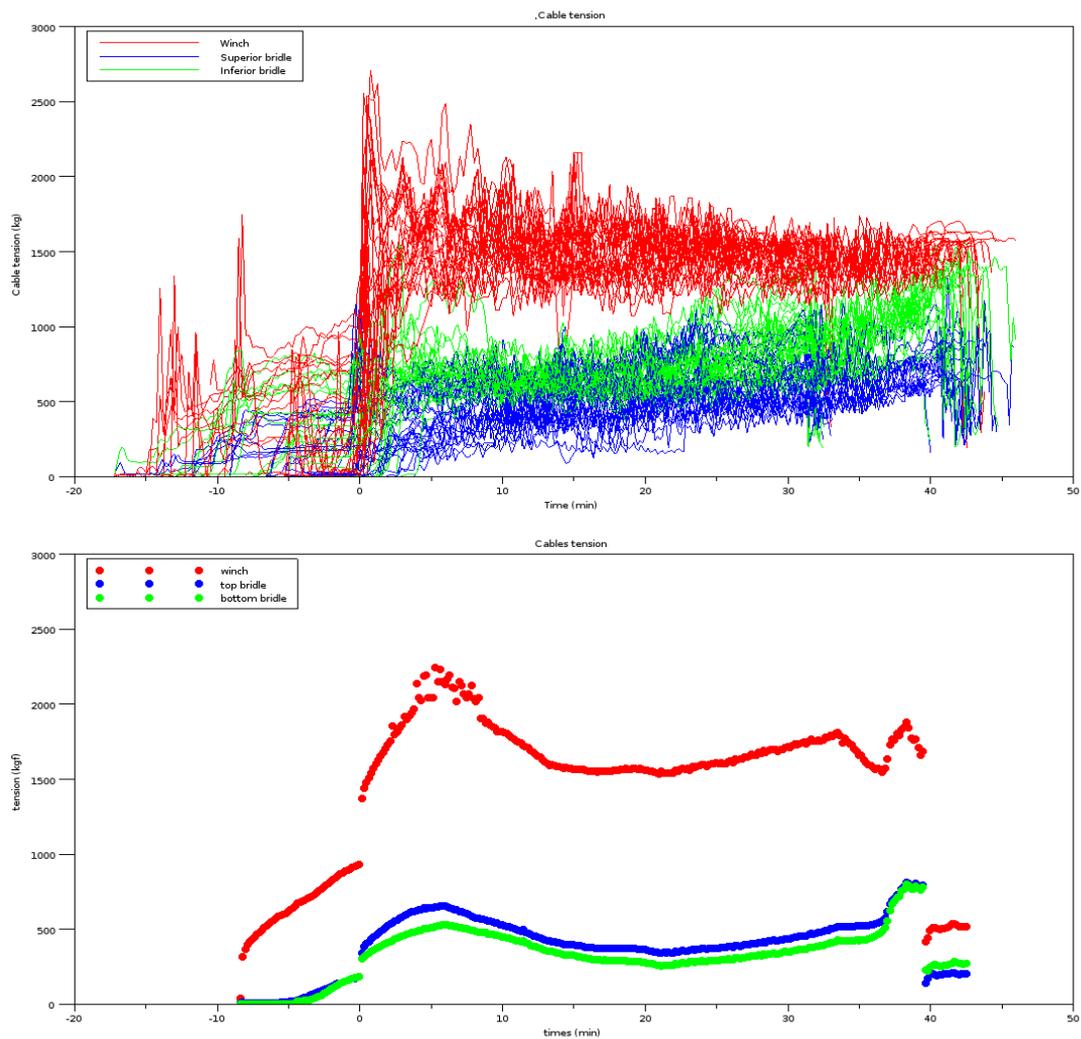
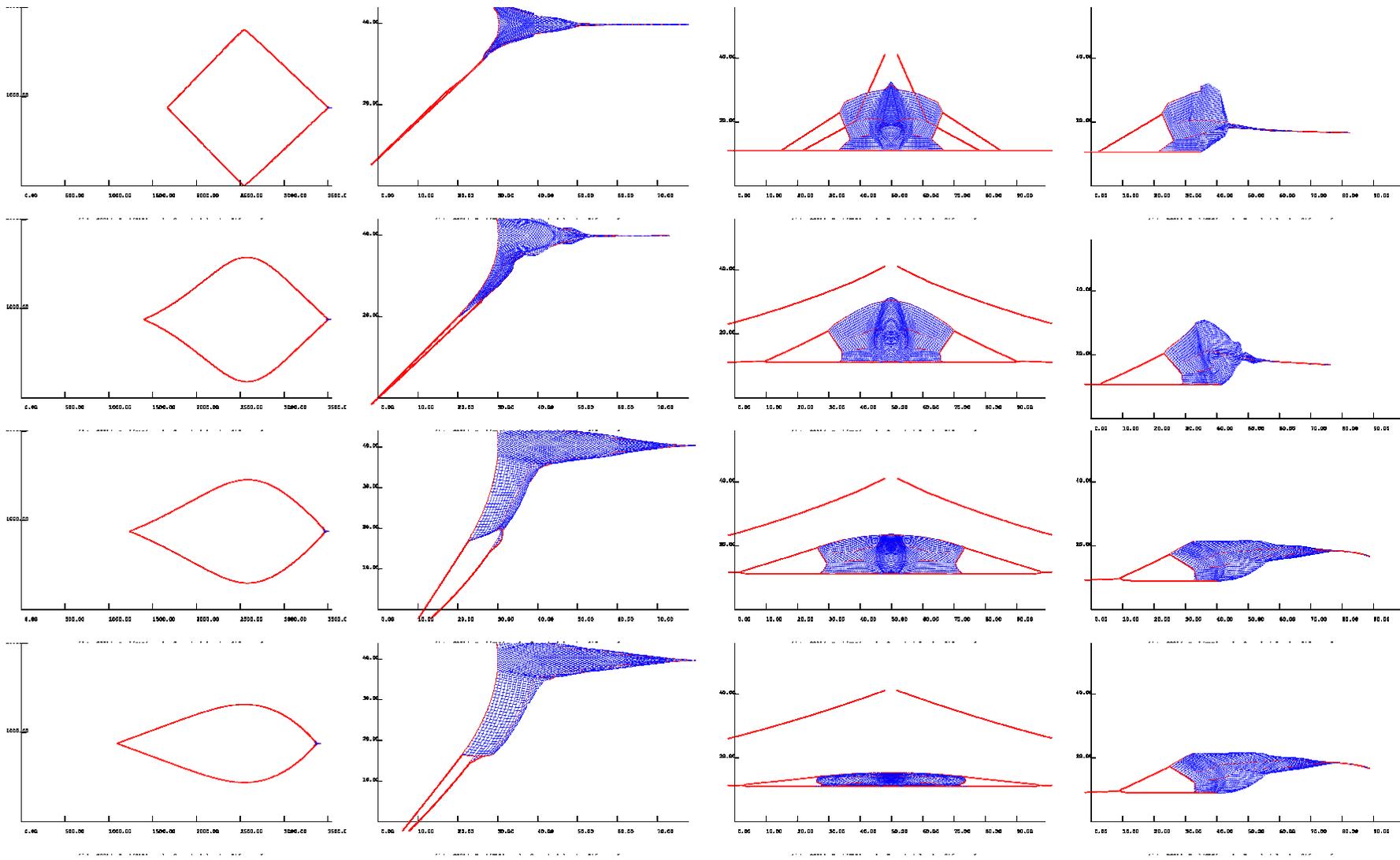
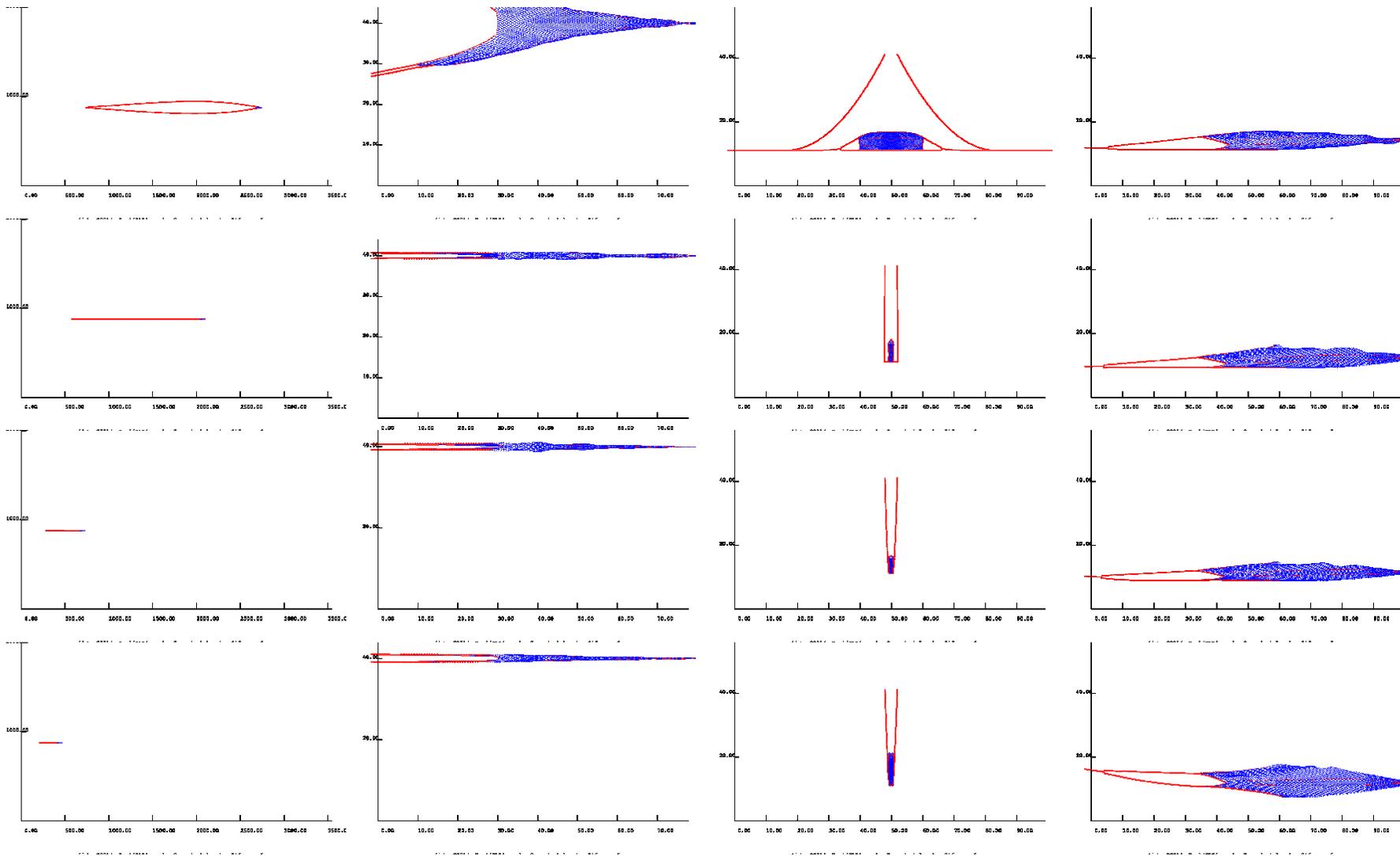


Figure 32 : Mesure (en haut) et simulation (en bas) des tensions de maillettes au treuil (en rouge), des pointes d'ailes inférieures (en vert) et supérieures (en bleu).

La forme prise par la senne lors du virage est synthétisée dans la Figure 33. Une grande variation de la forme du filet et de la senne est observable. L'ouverture verticale minimale est au environ de 4'. L'écartement entre les maillettes est très réduit dès 25'. Le décolllement du fond se situe entre 37' et 39'.





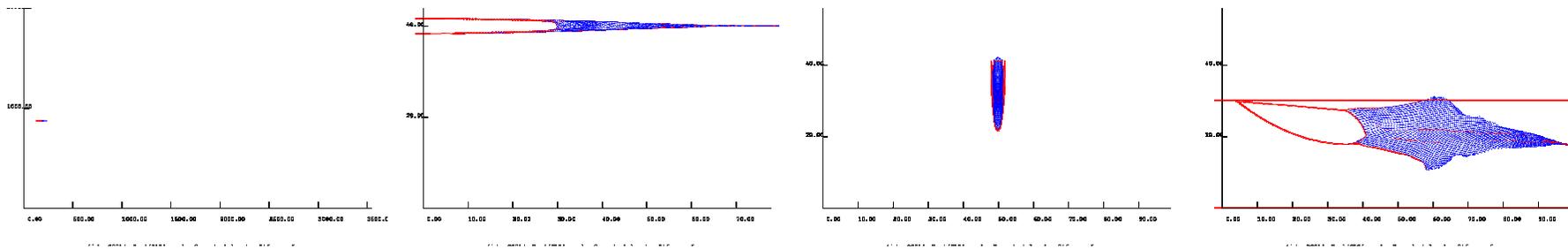
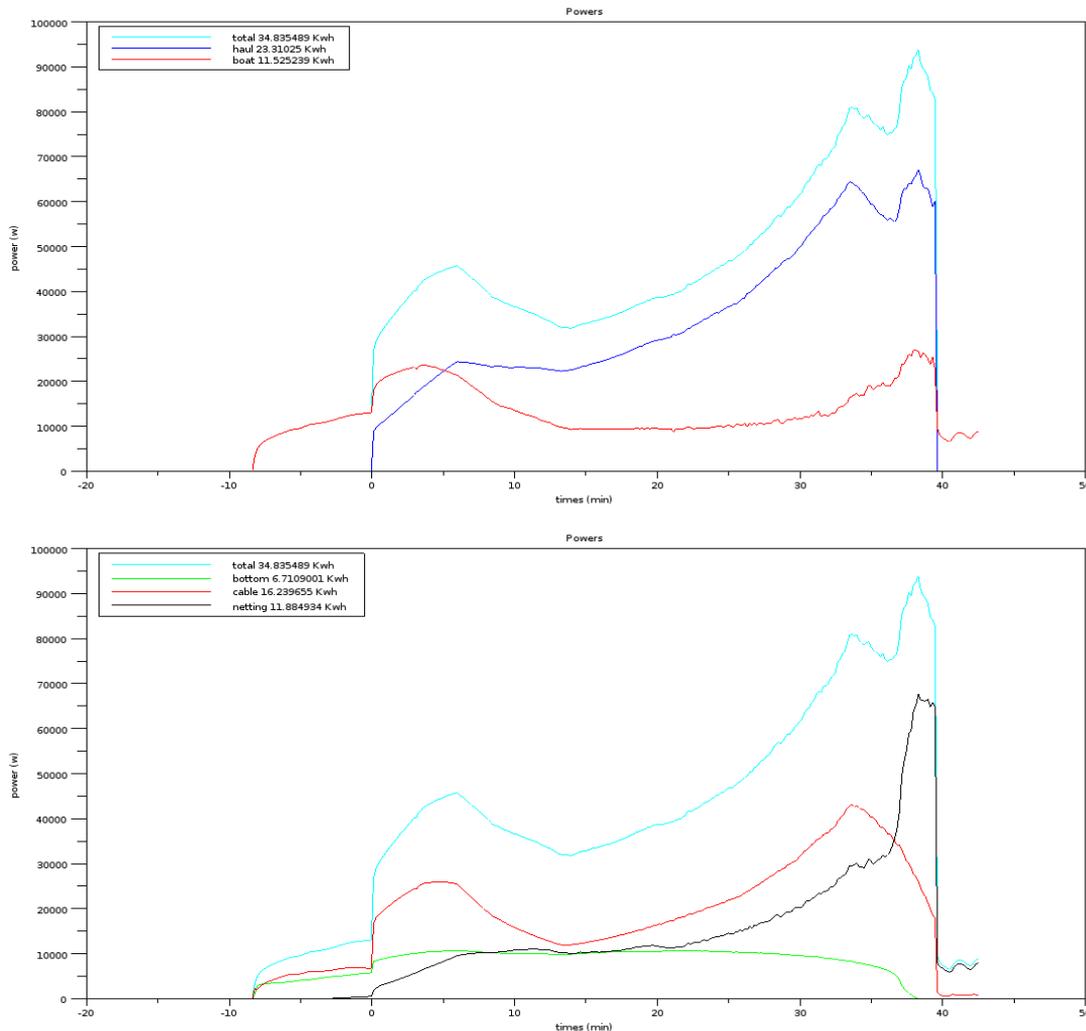


Figure 33 : Formes successives prises par la senne. De gauche à droite : la senne vue du dessus et le filet vue de dessus, face et profil. Les temps successifs sont, du haut vers le bas, -8', -3', 0', 4', 17', 25', 37', 39', et 40'.

### 8.2.4. Puissances absorbées et transmises

A partir de cette simulation du virage nous calculons les puissances absorbées par le frottement sur le fond et par les traînées hydrodynamiques des câbles et filet (bas de la Figure 34). Nous calculons aussi les puissances transmises d'une part par les treuils et d'autre par la propulsion du bateau (haut de la Figure 34).



*Figure 34 : Puissances transmises (en haut) par les treuils (bleu foncé) et par la propulsion (rouge) à l'engin de pêche en fonction du temps. La puissance totale transmise est en bleu ciel. Puissances absorbées (en bas) par la traînée sur le fond (vert) la traînée hydrodynamique des câbles (rouge) et la traînée hydrodynamique du filet (noir). La puissance totale est en bleu ciel (en haut et en bas).*

La puissance nécessaire à la propulsion (Figure 34 en haut) est à peu près constante entre 10 et 30 kW et la puissance transmise par les treuils varie à peu près linéairement entre 0 et 60 kW.

La traînée sur le fond (Figure 34 en bas) est à peu près constante (< 10 kW) pendant la majorité du temps, la traînée hydrodynamique du filet augmente fortement de 0 à 70 kW.

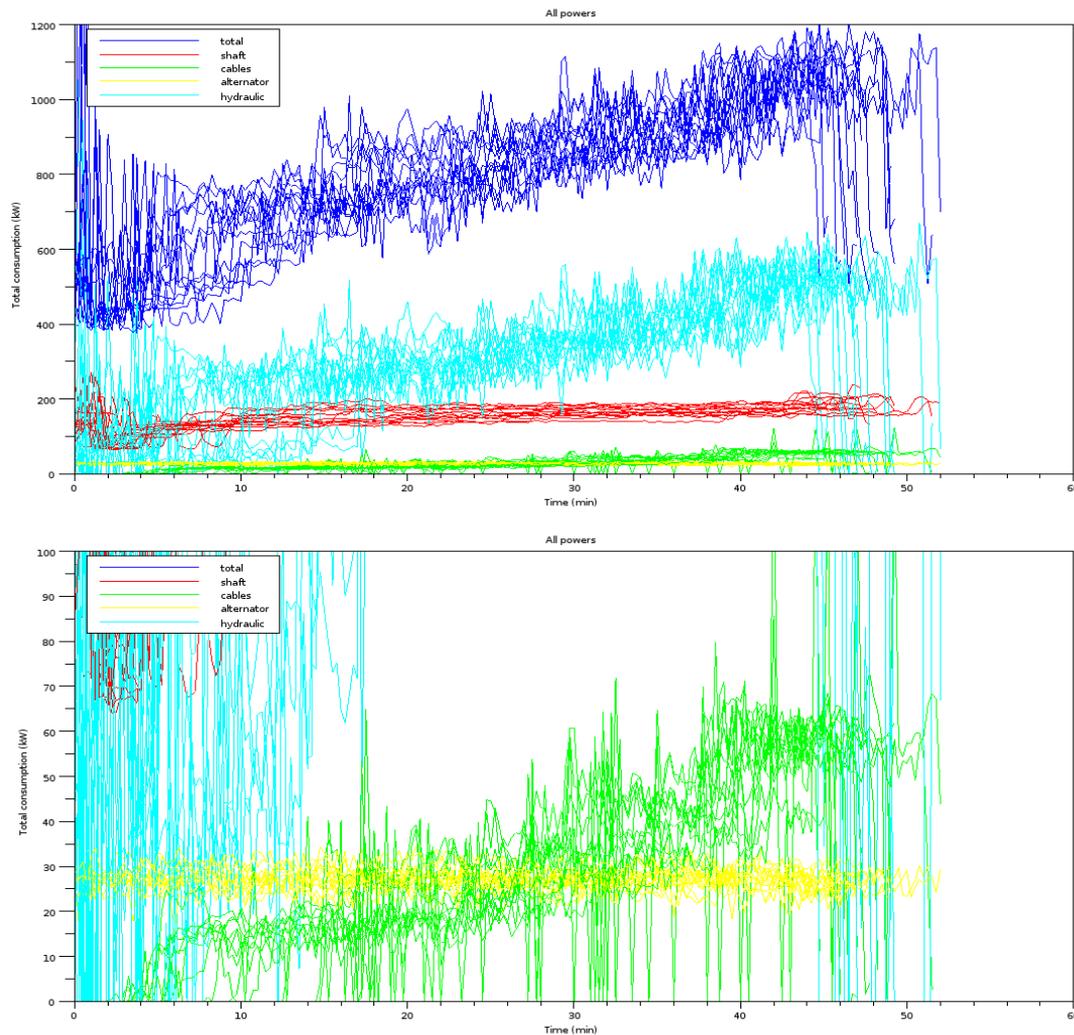


Figure 35 : Puissances mesurées. Puissance de la consommation de fuel (bleu foncé, en prenant 10 kWh par litre de fuel). Puissance de l'hydraulique (bleu ciel, c'est en fait une mesure indirecte). Puissance mesurée sur l'arbre hélice (rouge). Puissance cumulée des 2 treuils (en vert). Puissance de l'alternateur électrique (jaune). On notera que la figure du bas est un zoom de la figure du haut.

On remarque que la puissance totale consommée par les treuils varie de façon à peu près linéaire entre 0 et 55 Kw (courbe verte de la Figure 34). Cette puissance mesurée est à comparer avec les puissances simulées (courbe bleu foncée de la Figure 34). Ces puissances sont comparables, ce qui atteste de la qualité du modèle numérique.

### 8.2.5. Répartition de l'énergie de virage

A partir de cette simulation moyenne des 14 traits sélectionnés nous calculons l'énergie nécessaire à la traînée hydrodynamique des câbles, du filet et à la traînée sur le fond (Tableau 1). Cette énergie est transférée soit par les treuils qui virent les maillettes soit par le système propulsif.

L'énergie moyenne nécessaire au virage est de 34.8 kWh (Tableau 1).

- Cette énergie se répartit :
  1. en énergie nécessaire au frottement sur le sol (6.7 kWh, 19%),
  2. en énergie de traînée hydrodynamique des câbles c'est à dire essentiellement les maillettes (16.2 kWh, 47%),
  3. en énergie de traînée hydrodynamique du filet (11.9 kWh, 34%).

- Cette énergie nécessaire au virage est transmise :
  1. d'une part, par la propulsion du bateau (11.5 kWh, 33%)
  2. et d'autre part, par les treuils (23.3 kWh, 67%).

On peut en conclure qu'il faut attacher une importance particulière aux maillettes (forte traînée) et aux treuils (notamment les rendements).

		kWh	Total kWh	%
Energie fournie	Propulsion	11.5	34.8	33
	Treuil	23.3		67
Energie dissipée	Traînée sur le fond	6.7	34.8	19
	Traînée hydrodynamique des câbles	16.2		47
	Traînée hydrodynamique du filet	11.9		34

Tableau 1 : Estimation par le modèle de la répartition de l'énergie nécessaire au virage. L'énergie moyenne nécessaire au virage est de 34.8 kWh.

## 9. Analyse des résultats

La puissance disponible sur l'arbre hélice va être utilisée pour :

- vaincre la résistance à l'avancement du navire
- tracter l'engin de pêche
- vaincre les résistances parasites (pertes) associées à la ligne d'arbre (presse-étoupe...).

### 9.1. Analyse en route libre

En route libre, seuls les éléments 1 et 3 de la précédente liste sont présents. Nous allons donc utiliser ces conditions et le calcul de résistance précédemment réalisé pour déterminer les pertes sur la ligne d'arbre.

Pour ramener la puissance propulsive sur l'arbre hélice, il est nécessaire de diviser la valeur obtenue par la simulation (Figure 22) par le rendement propulsif estimé et d'y ajouter un offset correspondant aux pertes diverses sur l'arbre. Cet offset étant estimé à partir des mesures par optimisation simultanée du rendement propulsif global et de l'offset. On obtient ainsi un offset de 80 kW et un rendement propulsif global de 0.45. Si le rendement semble acceptable la valeur de l'offset optimal est fort mais correspond aux mesures réalisées (de l'ordre de 80 kW de puissance sur la ligne d'arbre à vitesse nulle du bateau) ; une analyse plus fine des pertes sur la ligne d'arbre serait donc souhaitable.

Les résultats de comparaison en route libre sont donnés sur la Figure 36. On remarquera un bruit assez fort aux basses vitesses mais une bonne détection de l'augmentation de puissance au voisinage de 7 nœuds. Au-delà de 8 nœuds le plateau de puissance mesurée, qui n'était pas attendu, nécessite une étude plus approfondie.

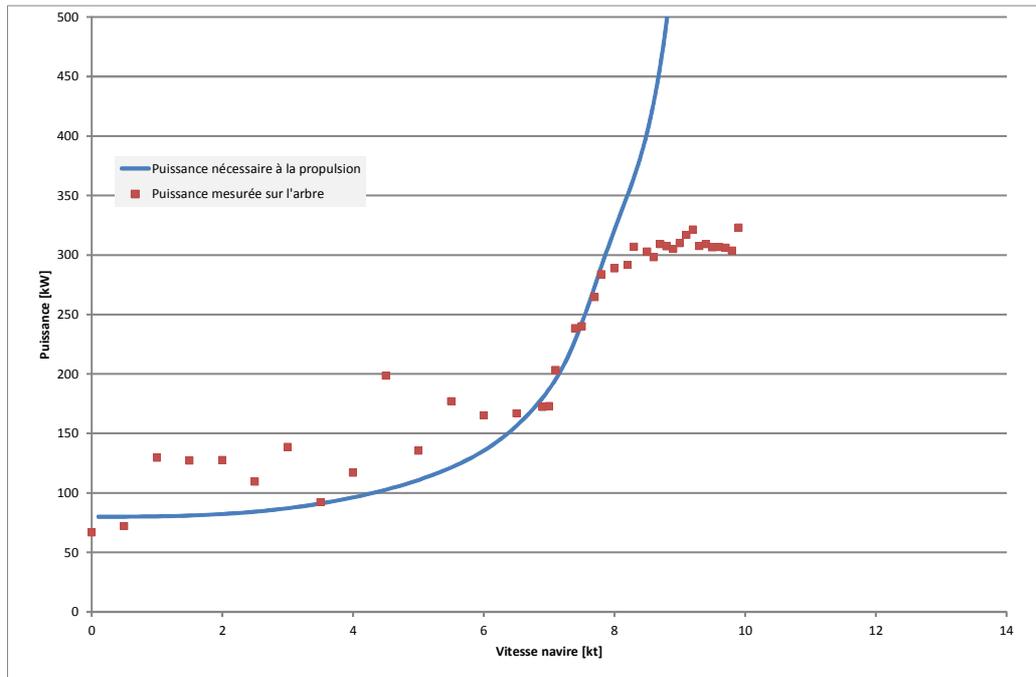


Figure 36: Comparaison des puissances en route libre.

## 9.2. Analyse en action de pêche

Pour comparer les puissances mesurées sur l'arbre avec les puissances calculées au chapitre précédent nous allons analyser les résultats pendant la phase de virage du chalut (navire en avance lente et treuils en action) pour les 14 traits qui ont été analysés au chapitre précédent.

Pour les 14 traits la même méthode a été utilisée. La durée des traits étant quasiment constante les mesures ont été moyennées sur 10 intervalles de 300 secondes chacun. Puis une moyenne des données ainsi recalées pour chaque intervalle de temps a été réalisée. Les résultats sont donnés sur la Figure 37.

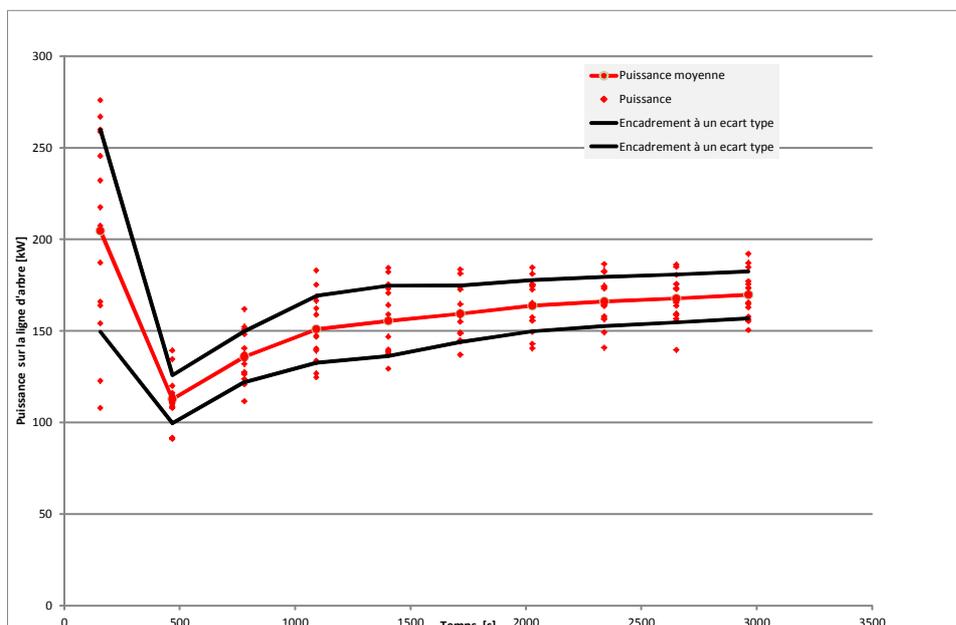


Figure 37: Puissances mesurées pendant la phase de virage.

La puissance ainsi mesurée peut être décomposée entre la puissance perdue sur l'arbre, la puissance dissipée sur la coque et la puissance destinée à l'action de pêche. Cette décomposition est présentée sur la Figure 38.

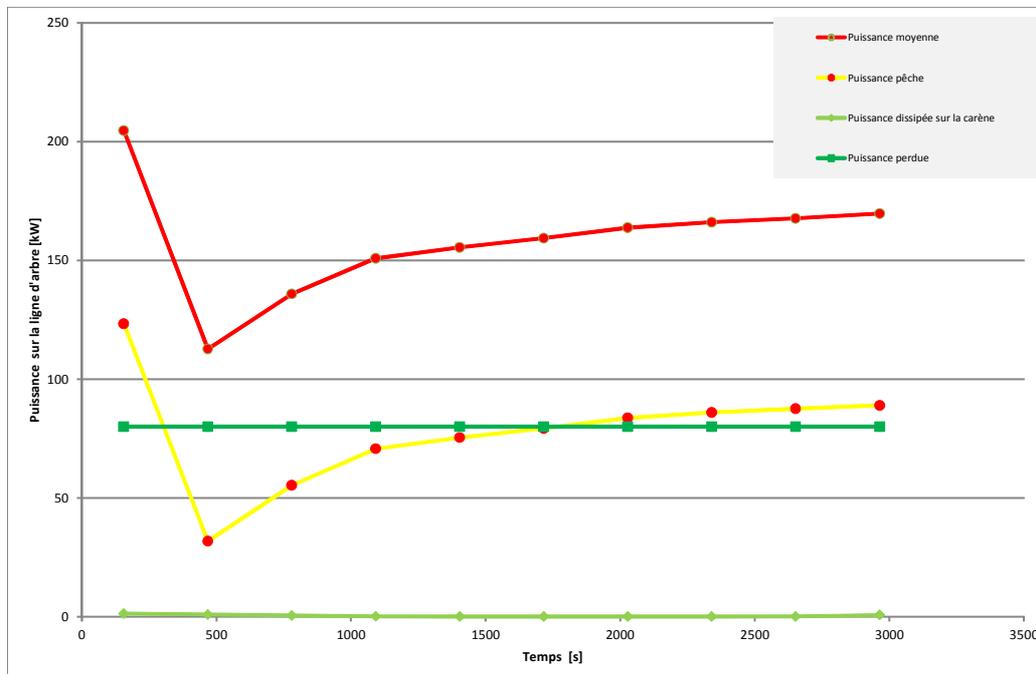


Figure 38: Décomposition de la puissance sur l'arbre

Il est ainsi évident que pendant l'action de pêche en raison des vitesses extrêmement faibles du navire l'énergie nécessaire à la propulsion du bateau lui-même est négligeable (0.3 %) et que toute l'énergie est utilisée d'une part à vaincre les pertes diverses sur la ligne d'arbre (50.4 %), en particulier les pertes sur le presse-étoupe de ligne d'arbre et par l'hélice devraient être examinées soigneusement, et d'autre part à l'action de pêche elle-même (49.3 %).

Si l'on compare enfin l'ordre de grandeur de la puissance utile en fin de virage (89 kW, Figure 38) à la puissance moteur présentée Figure 34 (27 kW) ramenée sur l'arbre avec un rendement de l'hélice de l'ordre de 0.3 (90 kW), il est évident que ces deux valeurs sont tout à fait cohérentes.

## 10. Aspects économiques et halieutiques

Les principaux chiffres économiques de l'armement pour 2013 sont donnés dans le Tableau 2. Il est à noter que le bateau est utilisé 200 j par an à la senne Danoise et 50 j par an au chalut pélagique. Le Tableau 2 est pour l'essentiel relatif à l'ensemble (senne Danoise et chalut pélagique). Les consommations de gas-oil pour la route et la pêche ont été estimées à partir des chiffres obtenus lors des deux semaines d'essais. La quantité commercialisée est utilisée comme production de poisson.

Production annuelle de poisson	238661 Kg
Chiffre d'affaire annuel	1264361 €
Jours de mer annuels	200+50 J
Coût annuel du gas-oil	209570 €
Prix du gas-oil	0.65 €/l
Consommation moyenne par jour en litres	1612 l
Litres de gas-oil par kg de poisson	1.35 l/kg
Prix de vente du poisson au kg	5,30 €/kg
Part du coût gas-oil dans le chiffre d'affaire	17 %
Consommation annuelle de gas-oil pour la route	188 m <sup>3</sup>
Consommation annuelle de gas-oil pour la pêche	134 m <sup>3</sup>

*Tableau 2 : Données économiques et halieutiques pour 2013 (senne Danoise et chalut pélagique).*

Ces données montrent que la part du gas-oil dans le chiffre d'affaires est actuellement à un niveau assez élevé (17 %, déterminé sur la base d'une année). Pour les chalutiers exclusifs d'une longueur similaire, le ratio était de 24 % en 2010 et de 27 % en 2011 (référence : Synthèse des flottilles de pêche, rapport annuel Ifremer) pour un prix moyen au litre respectivement de 0.53 et 0.68.

La consommation pour la route (188 m<sup>3</sup>) est plus importante que la consommation effective lors des opérations de pêche (134 m<sup>3</sup>). Il s'agit d'une extrapolation à partir des deux semaines d'essais.

## 11. Pistes d'améliorations

### 11.1. L'économètre

L'économètre, dans l'état actuel, enregistre toutes les 15 secondes l'ensemble des mesures des capteurs du bateau (position GPS, vitesse GPS, consommation horaire de gas-oil, vitesse des treuils, longueurs filées par les treuils, le couple et la vitesse de l'arbre hélice, la puissance de l'alternateur...). Il serait plus efficace pour le patron d'avoir un prétraitement de ces mesures. Nous pouvons imaginer :

- un prétraitement pour la route pourrait être de la forme de la Figure 39 et donnerait alors la consommation par mille parcouru en fonction de la vitesse. Dans ces conditions le patron pourra voir rapidement si la consommation en route est proche de l'optimum, aux conditions environnementales près (vent, houle et courant).
- un ensemble de courbes pour les opérations de pêche, qui donne la relation entre la consommation nécessaire à chaque trait et, par exemple, la vitesse moyenne du bateau, la vitesse moyenne de virage, etc. Dans ces conditions le patron pourra éventuellement détecter les facteurs influençant la consommation.
- Compte tenu de la complexité et la quantité de données générées par l'économètre, une restitution au patron sous forme de moyennes calculées automatiquement améliorera leur analyse.

## 11.2. Rendement des treuils

Les rendements des treuils hydrauliques sont généralement estimés au environ de 50-80 %. Ils pourraient être remplacés par des treuils au rendement plus élevé tels que les treuils électriques, dont les rendements sont de l'ordre de 90-95 %.

Un trait coûte environ 108 l de fuel dont environ 55 l uniquement pour le virage (cf. Figure 14). Le treuil consomme 67 % de cette énergie (Tableau 1), soit 37 l. En utilisant un treuil électrique dont le rendement est de 92.5 % au lieu d'un treuil hydraulique de 65 % de rendement, la consommation de fuel passerait de 37 l à 26 l, soit une économie de 11 l sur les 108 l du trait (10 %). Ce qui donne 528 l d'économie pour les 48 traits réalisés lors des 2 semaines d'essai. Ramenée à une année entière (Tableau 2) l'économie atteindrait 8894 €.

Les treuils électriques ont des encombrements et des masses qui ne sont pas forcément compatibles avec cette technique de pêche. Une étude spécifique à l'architecture du chalutier senneur serait à envisager pour installer ce type d'équipement.

## 11.3. Vitesse de route

Pour la route (hors opérations de pêche) la consommation de fuel par mille parcouru dépend grandement de la vitesse du bateau. L'optimum est de 8 à 9 l par mille parcouru ; il est obtenu à 6-7 nœuds de vitesse (Figure 36 et Figure 39).

La consommation lors de la route à des vitesses supérieures à 7.5 nœuds est de 3851 l pour les 2 semaines et de 3547 l pour les vitesses inférieures à 7.5 nœuds, soit une consommation totale pour la route de 7398 l.

La consommation par mille à des vitesses supérieures à 7.5 nœuds est d'environ 10.8 l/mille (Figure 36 et Figure 39) et de 7.4 l/mille pour une vitesse proche de 7.5 nœuds. Il semble que si la route qui a été parcourue à des vitesses élevées (supérieures à 7.5 nœuds) était parcourue à 7.5 nœuds cela engendrerait une économie de 1200 l pour les deux semaines d'essais. Ramené à une année entière (Tableau 2) l'économie atteindrait 20957 €.

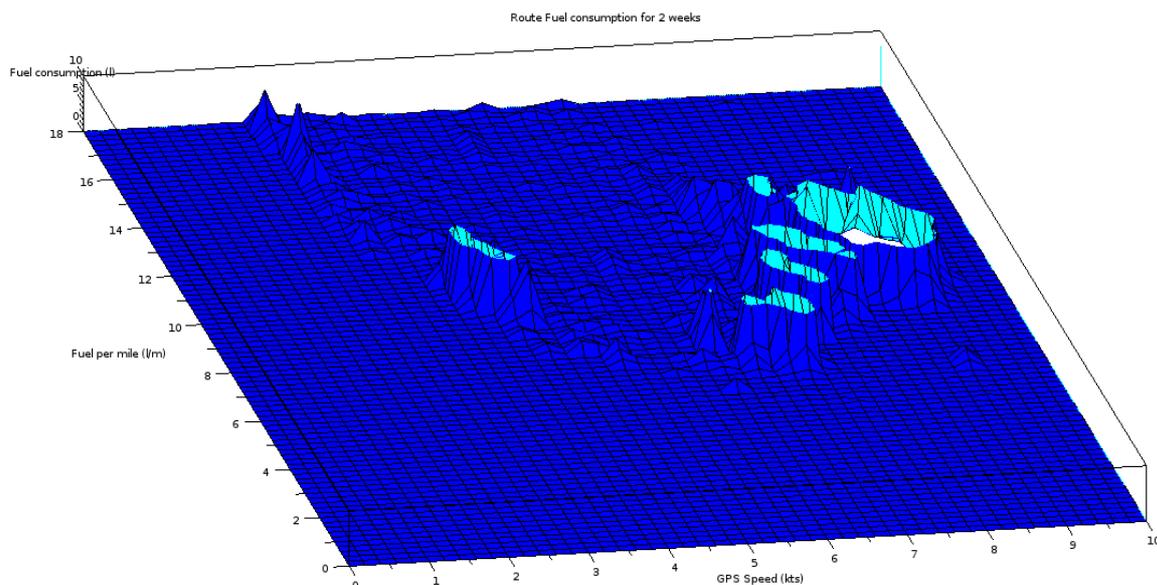


Figure 39 : Litre de fuel consommé par mille parcouru en fonction de la vitesse (horizontal). L'axe vertical représente la quantité effectivement consommée lors des deux

semaines d'essai. Cette consommation est tronquée à 10 l. On note qu'une partie importante de la consommation est réalisée au delà de 7.5 nœuds.

## 11.4. Ligne d'arbre et hélice

L'offset de puissance nécessaire à la ligne d'arbre (Figure 36) est de 80 kW. Si cet offset reste constant pour toutes vitesses du bateau, ce qui n'est pas assuré, les 200 jours annuels de pêche (Tableau 2) par cette puissance et un rendement de moteur de 0.3 représente une énergie de 384000 kWh. En estimant une énergie de 10 kWh par litre de gas-oil cette énergie nécessite 38400 l de gas-oil par an.

Une analyse plus précise de ces pertes qui permettrait de diviser par deux l'offset de puissance générerait une économie annuelle de 19200 l de gas-oil soit 12480 €.

## 11.5. La maillette

### 11.5.1. Une maillette plus légère

Le remplacement de la maillette par une maillette plus légère de 10 % relativement à la densité de l'eau de mer ( $1339 \text{ kg/m}^3$  au lieu de  $1374 \text{ kg/m}^3$ ) réduira la traînée sur le fond du câble. Il est probable que la capacité de pêche avec ce nouveau câble se trouvera modifiée.

		kWh	Total kWh	%
Energie fournie	Propulsion	11.0	34.2	32
	Treuil	23.2		68
Energie dissipée	Traînée sur le fond	6.1	34.2	18
	Traînée hydrodynamique des câbles	16.0		47
	Traînée hydrodynamique du filet	12.1		35

Tableau 3 : Estimation par le modèle de la répartition de l'énergie nécessaire au virage pour une maillette plus légère. Ces valeurs sont à comparer avec celles du Tableau 1.

L'écart est assez faible avec la maillette non modifiée (Tableau 1) : -0.5 kWh pour la propulsion et -0.1 kWh pour les treuils. Soit 0.59 l de gas-oil par trait en reprenant un rendement d'hélice de 0.3, un rendement de moteur de 0.3 et 10 kWh d'énergie par litre de gas-oil. Pour une année entière cela représente uniquement 479 € d'économie.

### 11.5.2. Une maillette de plus petit diamètre

Le remplacement de la maillette par une maillette d'un diamètre plus petit de 10% (32.4 mm au lieu de 36 mm) réduira la traînée hydrodynamique du câble et le frottement sur le fond car la maillette sera plus légère. Il est probable que la capacité de pêche de ce nouveau câble sera modifiée.

		kWh	Total kWh	%
Energie fournie	Propulsion	10.4	32.5	32
	Treuil	22.1		68
Energie dissipée	Traînée sur le fond	5.7	32.5	18
	Traînée hydrodynamique des câbles	14.8		46
	Traînée hydrodynamique du filet	12.0		37

Tableau 4 : Estimation par le modèle de la répartition de l'énergie nécessaire au virage pour une maillette de plus petit diamètre. Ces valeurs sont à comparer avec celles du Tableau 1.

L'écart est faible avec la maillette non modifiée (Tableau 1) : -1.1 kWh pour la propulsion et -1.2 kWh pour les treuils. Soit 1.6 l de gas-oil par trait en reprenant un rendement d'hélice de 0.3, un rendement de moteur de 0.3 et 10 kWh d'énergie par litre de gas-oil. Pour une année entière cela représente 1308 € d'économie.

## 11.6. La mise en oeuvre

Il semble que les maillettes soient très refermées dès la 25' après le début du virage (temps 6 sur la Figure 33), nous pouvons donc supposer que la capacité de pêche à partir de ce moment est très réduite : les poissons qui ne sont pas encore dans le chalut à cet instant pourront probablement s'échapper facilement. Dans ce cas il conviendrait de limiter au minimum la consommation de carburant pour les 14' restantes (Figure 34).

Une possibilité serait d'arrêter la propulsion du navire et ne garder que le virage des maillettes par les treuils. L'énergie ainsi économisée serait de 3.5 kWh au niveau de l'engin (intégrale de la puissance liée au bateau entre la 25' et la 39' sur la Figure 34, soit 10 kWh au niveau de l'arbre et 30 kWh au niveau du carburant avec un rendement de moteur de 0.3 soit une baisse de consommation de 3 l par trait, en estimant une énergie de 10 kWh/l de gas-oil. La baisse de consommation pour les 48 traits réalisés pendant les 2 semaines d'essais serait de 144 l de gas-oil. Ramenée à une année entière (Tableau 2), l'économie atteindrait 2426 €.

## 11.7. Synthèse des pistes d'amélioration

Une synthèse des améliorations quantifiables est présentée dans le Tableau 5.

Type d'amélioration	Economie annuelle
Amélioration rendements des treuils de 65 % à 92.5 %	8894 €
Réduction de la vitesse route à l'optimum (7.5 noeud)	20957 €
Amélioration du presse-étoupe/hélice d'un facteur 2	12480 €
Maillette plus légère de 10 % relativement à l'eau de mer	479 €
Maillette de plus petit diamètre de 10 %	1308 €
Arrêt de la propulsion une fois les maillettes jointives	2426 €

Tableau 5 : Economie annuelle estimée pour différentes améliorations envisagées.

Cela représente en tout 22 % de la consommation énergétique actuelle. Mais pour certains postes, l'économie effective dépendra d'un choix stratégique du commandant du navire. Rentrer au port à vitesse réduite ne permettra pas toujours d'être à l'heure pour le débarquement des pêches en criée. Et le patron devra aussi évaluer de l'intérêt ou non de faire une opération de pêche supplémentaire qui aura inévitablement un effet sur la

vitesse au retour au port. Augmenter le temps de route pour économiser du carburant peut donc avoir une incidence sur le chiffre d'affaires. Le choix peut ne pas être simple pour le commandant et des outils d'aide à la décision devrait pouvoir avoir leur place à la passerelle. Cela pourrait être des fonctions développées autour de l'économètre. Optimiser la navigation de pêche pourrait être un centre d'intérêt pour l'innovation dans le secteur d'activités lié à la pêche.

## 12. Conclusion

Le projet ENERSENNE est une première en matière d'utilisation de capteurs sur un navire de pêche et de modélisation conjointe navire-engin de pêche.

En matière de mesure à bord, cela a permis de vérifier l'importance relative de la route et des actions de pêche (consommation de même ordre de grandeur). Les énergies nécessaires aux actions de pêche ont été quantifiées par phases (filage, virage). L'économètre ECOMER a montré toute son importance pour ce type d'essai en mer.

En matière de modélisation du navire, cela a permis de mettre en évidence la forte perte de puissance à faible vitesse.

La modélisation de l'engin a permis d'estimer l'énergie consommée par les différentes parties de l'engin (maillette, chalut, Figure 40).

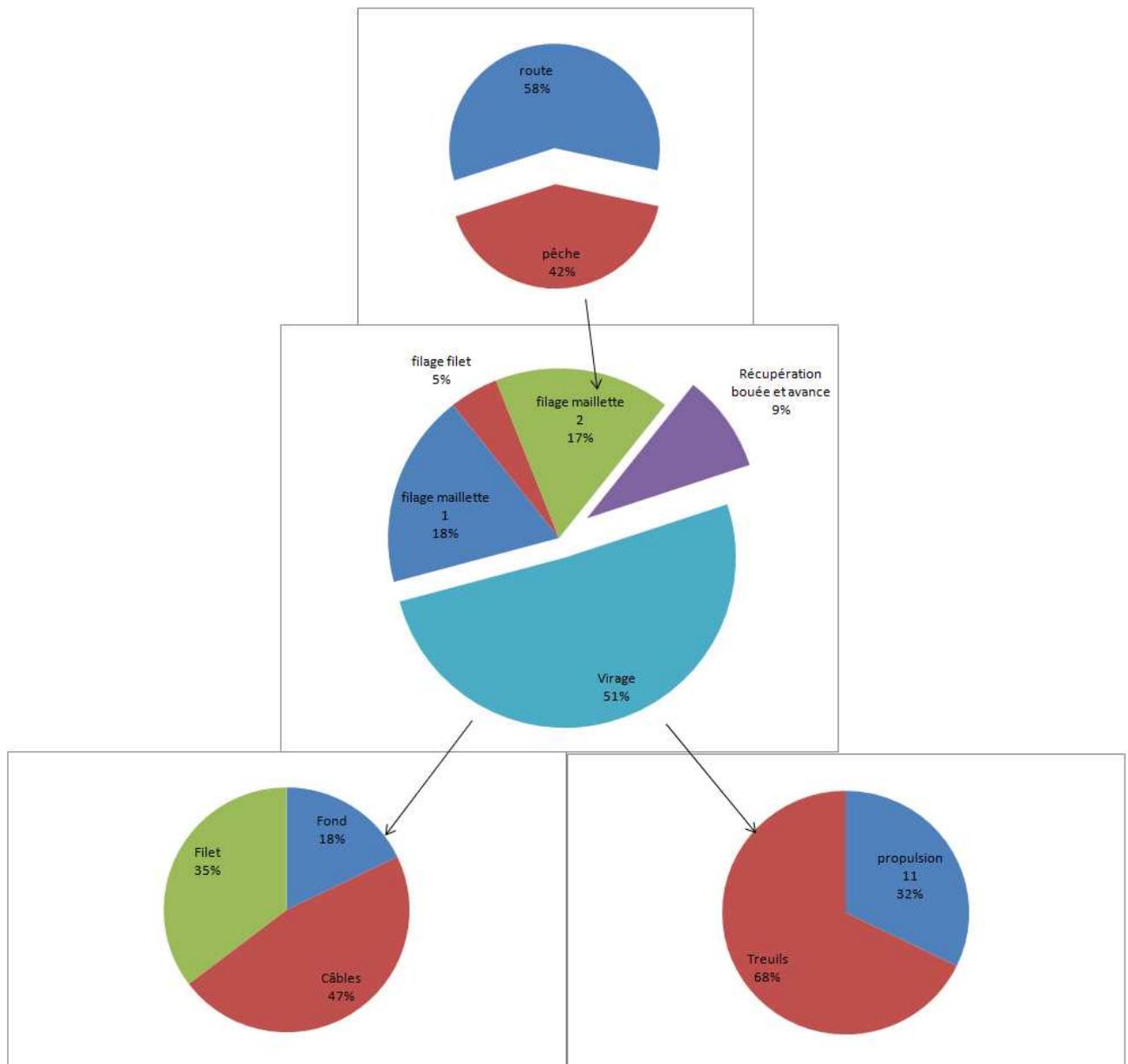


Figure 40 : Répartition des consommations de carburant : en haut la totalité lors des 2 semaines d'essais (la route et la pêche), au milieu les opérations de pêche (du filage au virage) et en bas le virage et le remorquage de l'engin, d'une part à gauche dans les consommateurs d'énergie (traînée sur le fond, traînée hydrodynamique des câbles et traînée hydrodynamique du filet) et d'autre part à droite les transmetteurs de l'énergie (la propulsion et les treuils).

Ces travaux permettent de dégager des scénarios d'amélioration : vitesse optimale en route, rendement des treuils, étude du presse étoupe/hélice...

Des travaux complémentaires pourraient maintenant être ciblés sur les points qui nous semblent les plus importants :

- Essai sur la traînée de la maillette seule pour évaluer avec précision le passage de l'adhérence à la friction. En effet les essais globaux entrepris dans ENERSENNE ne permettent pas d'accéder à cette information.
- La traînée du filet est fortement dépendante de sa forme. Des essais spécifiques en bassin sur des maquettes à adapter devraient largement améliorer notre connaissance sur ce point et améliorer d'autant nos évaluations.

- Des essais en mer pour quantifier précisément les scénarios d'amélioration que nous avons évalués. Ces scénarios sont à préciser avec les professionnels sur la base de nos travaux. Nous pouvons imaginer de stopper la propulsion au moment opportun sans modifier le rendement de pêche.
- Une étude spécifique sur la comparaison chalut / senne danoise, semble opportune.