



**HAL**  
open science

## Analyse de trajectoires fluviales à partir de données SIA pour la conception d'une passerelle

Tristan Lorino, Pierre Olivier Vandanjon, Jean Marie Prual, Alex Coiret

### ► To cite this version:

Tristan Lorino, Pierre Olivier Vandanjon, Jean Marie Prual, Alex Coiret. Analyse de trajectoires fluviales à partir de données SIA pour la conception d'une passerelle. RTS. Recherche, transports, sécurité, 2020, Comment développer une mobilité plus durable: vers une approche systémique, 2020, 7p. 10.25578/RTS\_ISSN1951-6614\_2020-03 . hal-02482046

**HAL Id: hal-02482046**

**<https://hal.science/hal-02482046>**

Submitted on 27 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

## DOSSIER / ISSUE

Comment développer une mobilité plus durable : vers une approche systémique  
*How to develop a more sustainable mobility : towards a systemic approach*

## Analyse de trajectoires fluviales à partir de données SIA pour la conception d'une passerelle

### Analysis of fluvial trajectories based on AIS data for the construction of a bridge

Tristan Lorino, Pierre-Olivier Vandanjon, Jean-Marie Prual, Alex Coiret

© Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR 2020

**Résumé** La Métropole Rouen Normandie souhaitait concevoir une nouvelle passerelle nécessitant des appuis provisoires en Seine. Aussi a-t-elle sollicité l'Ifsttar pour conduire une étude statistique des données de trajectoires, afin de définir les fuseaux de mobilité des navires en fonction notamment de leur vitesse et de leur gabarit, deux facteurs susceptibles d'avoir un impact sur la manœuvrabilité des navires. Le traitement des données au format SIA a nécessité de recourir à des outils dédiés aux gros fichiers de données. Puis un modèle de régression linéaire a été retenu pour l'analyse des trajectoires

rectilignes hors manœuvres d'accostage. La détermination d'intervalles de prédiction a permis de délimiter les zones de navigation, et donc de mettre en évidence les surfaces du fleuve aptes à accueillir les appuis provisoires.

**Mots-clés** Système d'identification automatique ; régression linéaire ; intervalle de prédiction ; logiciel R

**Abstract** The Métropole Rouen Normandie wanted to design a new bridge requiring temporary supports in the Seine. For this reason, it has been asked to Ifsttar to conduct a statistical study of trajectory data, in order to define the mobility spindles of vessels, in particular according to their speed and size. The both factors should have an impact on the maneuverability of ships. The processing of data in AIS format required the use of tools dedicated to large data files. Then a linear regression model was selected for the analysis of rectilinear trajectories excluding docking maneuvers. The determination of prediction intervals enabled to delimit the navigation areas, and thus to highlight the possible locations for the temporary supports of the bridge in the river.

**Keywords** Automatic Identification System ; linear regression ; prediction interval ; R software

---

Tristan Lorino (✉)  
AME-EASE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,  
44344 Bouguenais, France  
courriel : tristan.lorino@ifsttar.fr

Pierre-Olivier Vandanjon (✉)  
AME-EASE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,  
44344 Bouguenais, France  
courriel : pierre-olivier.vandanjon@ifsttar.fr

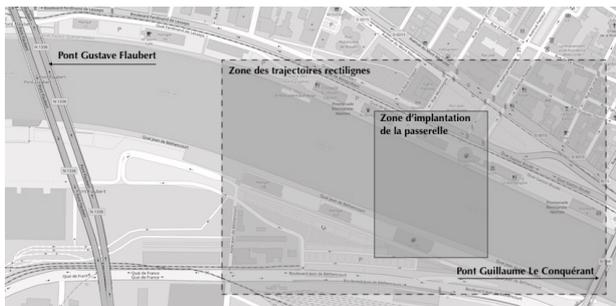
Jean-Marie Prual (✉)  
AME-EASE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,  
44344 Bouguenais, France  
courriel : jean-marie.prual@ifsttar.fr

Alex Coiret (✉)  
AME-EASE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,  
44344 Bouguenais, France  
courriel : alex.coiret@ifsttar.fr

## 1. Introduction

La Métropole Rouen Normandie (MRN) a sollicité l'Ifsttar concernant la réalisation d'un nouvel ouvrage pour le franchissement de la Seine, qui sera une passerelle dédiée aux modes doux (cycles, piétons). Il complètera l'offre de franchissement existante et reliera efficacement des pôles générateurs de déplacements dans l'agglomération, et notamment l'éco-quartier Luciline en cours de réalisation en rive droite et l'éco-quartier Flaubert en projet en rive gauche, dans le cadre du projet global Seine City [3]. L'ouvrage est donc envisagé dans le secteur ouest de l'agglomération rouennaise, entre les ponts Guillaume Le Conquérant et Gustave Flaubert (fig. 1).

**Figure 1** Zone d'étude des trajectoires fluviales rouennaises pour l'installation d'une passerelle



Source : Openstreetmap et Ifsttar

Les appuis principaux de la structure seront situés dans l'alignement des hangars existants. Même s'il n'est pas envisagé d'implanter d'appui définitif en Seine, le recours à des appuis intermédiaires en phase de réalisation de l'ouvrage semble incontournable. De même, la définition d'un gabarit de passe navigable influe sur la définition de la limite basse d'intrados d'ouvrage et donc sur la définition des accès. Seule une connaissance fine des trajectoires fluviales entre le Pont Guillaume le Conquérant en amont et le Pont Flaubert en aval peut permettre de gagner en précision sur la définition des implantations possibles d'appuis provisoires, puis sur la définition du gabarit fluvial définitif.

Cette connaissance des trajectoires est désormais possible. En effet, les navires concernés par la convention Solas (*Safety Of Life at Sea*) de l'Organisation maritime internationale doivent être équipés d'un système d'identification appelé SIA (Système d'identification automatique, AIS en anglais pour *Automatic Identification System*) qui transmet, entre

autres informations, la position du navire [2]. De plus, les navires qui ne rentrent pas dans le champ d'application de Solas s'équipent spontanément de ce type de système pour des raisons de sécurité. Ainsi, le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) a accès aux trajectoires des navires et les enregistre dans une base de données depuis 2006.

À partir de cette base de données, une analyse statistique des trajectoires de navires sur la zone d'étude définie par la MRN a été menée. Cet article présente tout d'abord le contexte d'acquisition des données, ainsi que leur nature. Il fournit ensuite les différentes étapes de la procédure d'analyse statistique, notamment l'identification des trajectoires individuelles par sens de navigation, gabarit et vitesse, puis leur ajustement par un modèle de régression linéaire. Enfin il fournit des illustrations des différents flux maritimes et conclut par la détermination de zones propices à l'implantation des appuis provisoires de la passerelle.

## 2. Exploitation des données

### 2.1. Description des données

Les données ont été fournies par le service du chenal du GPMR. Ce sont des données de localisation des navires fournies sous le format de messages SIA. Deux types de messages sont transmis par les navires et stockés au format texte : les messages dynamiques (dont l'intervalle de temps entre chacun d'eux est fonction de la vitesse de déplacement et de rotation du navire) et les messages statiques relatifs à l'identité, la géométrie et les caractéristiques générales du navire. Tout message correctement reçu par l'un des trois transpondeurs du GPMR est stocké dans une base de données opérationnelle depuis 2006. Parmi les informations contenues dans ces messages et nécessaires à la détermination des trajectoires fluviales, il faut citer :

- concernant les messages dynamiques :
  - le numéro MMSI (*Maritime Mobile Service Identity*), code de neuf chiffres que l'Agence nationale des fréquences attribue à un navire exploitant des équipements radio et qui permet de l'identifier de façon sûre,
  - la vitesse en nœuds (nd),
  - l'abscisse en Lambert I nord [4],
  - l'ordonnée en Lambert I nord [4],
  - les date et temps d'enregistrement du message ;

- concernant les messages statiques :
  - le numéro MMSI,
  - la distance étrave-antenne GPS (*Global Positioning System*) en mètres (m),
  - la distance étambot-antenne GPS en m,
  - la distance babord-antenne GPS en m,
  - la distance tribord-antenne GPS en m,
  - les date et temps d'enregistrement du message.

Seules les données de 2016 ont été retenues pour l'analyse statistique, en raison de leur caractère récent et de leur grand nombre (tab. 1), et donc de leur représentativité de l'ensemble des flux maritimes actuels.

**Tableau 1** Effectif des données pour l'année 2016

| Période     | Données dynamiques |         | Données statiques |         |
|-------------|--------------------|---------|-------------------|---------|
|             | Messages           | Navires | Messages          | Navires |
| Janv.-mars  | 3 657 602          | 232     | 3 651 976         | 230     |
| Avril-juin  | 3 448 677          | 241     | 3 389 631         | 240     |
| Juil.-sept. | 2 280 994          | 641     | 2 271 854         | 630     |
| Oct.-déc.   | 2 980 323          | 178     | 2 945 159         | 178     |

Source : Ifsttar

## 2.2. Traitement des données

Le traitement des données, réalisé avec le logiciel R [5] et des bibliothèques spécifiques à la manipulation de grands tableaux de données (*data.table* [1] et *dplyr* [6]), s'est déroulé selon les six étapes suivantes.

### Étape 1 : données dynamiques

- Importation des données;
- Extraction des années, mois et jours d'enregistrement;
- Sélection de 3 mois consécutifs de 2016.

### Étape 2 : données statiques

- Importation des données;
- Extraction des années, mois et jours d'enregistrement;
- Sélection des 3 mêmes mois consécutifs de 2016;
- Calcul de la largeur des navires (distance babord-antenne GPS + distance tribord-antenne GPS), puis de leur gabarit (petit gabarit si la largeur est inférieure à 10 m, gros gabarit sinon).

### Étape 3 : détermination des berges

Détermination des équations linéaires des polygones constituées par les berges sur leur partie rectiligne (ordonnée Lambert en fonction de l'abscisse Lambert).

### Étape 4 : troncature des trajectoires

- Restriction des données à la partie rectiligne des trajectoires (cf. fig. 1);

- Restriction des données aux trajectoires situées entre les deux berges (suppression des données aberrantes liées à l'imprécision du GPS).

### Étape 5 : détermination du sens de navigation

- Ajout d'un identifiant IdN pour chaque modalité du croisement MMSI/mois/jour;
- Pour chaque IdN, calcul de la différence  $\Delta$  entre les ordonnées Lambert de deux enregistrements temporellement successifs (avec prise en compte des heures et secondes de chaque enregistrement);
- Si  $\Delta = 0$  : navire immobile; si  $\Delta > 0$  : déplacement en sens aval, sinon sens amont - ce choix étant valable localement, c'est-à-dire pour le méandre étudié.

### Étape 6 : détermination des trajectoires linéaires

- Ajout d'un identifiant IdT pour chaque modalité du croisement MMSI/mois/jour/sens;
- Suppression des immobilités ( $\Delta = 0$ ).

## 2.3. Filtrage des données et analyse statistique

L'étape 6 du traitement des données requiert un filtrage des données qui est présenté dans la première partie de cette sous section. Afin de calculer un fuseau de trajectoire, nous utiliserons un intervalle de confiance construit à partir d'une régression linéaire. Cette méthode est présentée dans la deuxième partie de cette sous section. Cette méthode a été appliquée après avoir segmenté les trajectoires en différentes catégories.

### 2.3.1. Détermination des trajectoires linéaires

Afin de distinguer les navires évoluant durablement dans une même direction des autres navires (amarrés, en manœuvre d'accostage ou de virement, etc.) qui ne sont pas dimensionnants pour cette étude, l'hypothèse suivante a été formulée. Compte tenu de la géométrie de la zone d'étude (voir fig. 1), les navires qui évoluent durablement et donc qui sont dimensionnants ont une trajectoire rectiligne. Un modèle de régression linéaire a donc été appliqué à chacune de leurs trajectoires. Ce modèle s'écrit :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \tag{1}$$

où Y et X sont respectivement les ordonnées et abscisses en Lambert I d'un point de positionnement d'un navire,  $\beta_0$  et  $\beta_1$  sont des coefficients à estimer, et  $\epsilon$  est un terme d'erreur supposé suivre une loi gaussienne centrée de variance  $\sigma^2$ . Le coefficient de détermination  $R^2$ , associé

à l'équation (1), mesure l'adéquation du modèle de régression aux données observées qui ont permis d'établir ce modèle. Par définition :

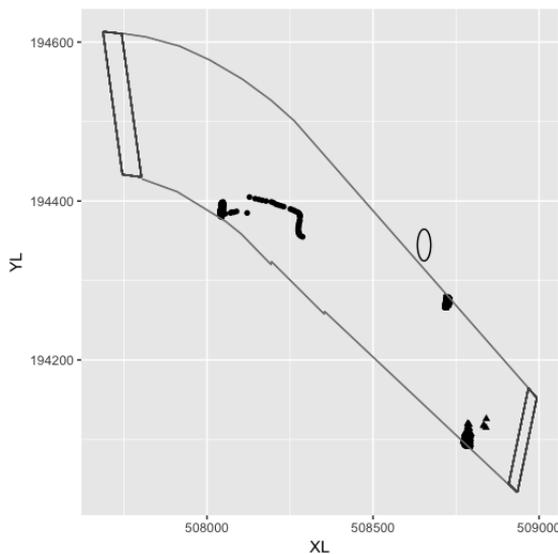
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

avec  $\hat{y}_i$  la  $i^e$  ordonnée issue de l'ajustement linéaire,  $\bar{y}$  la moyenne des  $y_i$  et  $n$  la taille de l'échantillon.

Le calcul de  $R^2$  a conduit à la répartition des trajectoires en deux groupes : d'un côté les trajectoires linéaires ( $R^2 > 90\%$ ), de l'autre les trajectoires non linéaires ( $R^2 \leq 90\%$ ). Cette valeur de 90 %, qui traduit une excellente adéquation du modèle aux données, a conduit à identifier 70 % de la totalité des trajectoires comme étant des trajectoires linéaires.

La figure 2, comme les suivantes, comprend les ponts Guillaume le Conquérant et Flaubert (parallélogrammes aux deux extrémités de la figure), les berges reliant ces ponts, ainsi que la tour panorama XXL (symbolisée par un ovale) qui sert de point de repère géographique. Sur cette figure ont été tracées des trajectoires non linéaires, qui caractérisent des manœuvres d'accostage : les points symbolisant les trajectoires viennent en effet toucher les berges. A contrario, la figure 3 illustre la linéarité de trajectoires pour lesquelles le coefficient de détermination excédait 90 %.

**Figure 2** Exemples de trajectoires fluviales non linéaires, caractéristiques de manœuvres d'accostage

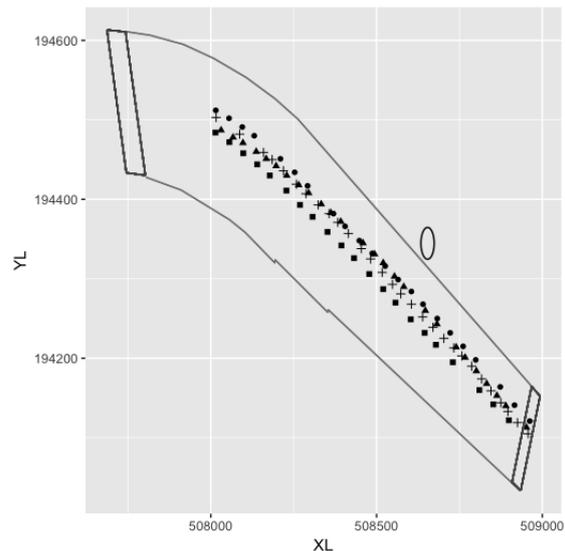


Source : Ifsttar

### 2.3.2. Catégorisation des navires

La MRN nous a demandé d'étudier séparément les trajectoires orientées selon la taille et la vitesse des navires. L'hypothèse sous-jacente était de concentrer l'étude sur les trajectoires des navires dont la manœuvrabilité est faible et qui sont dimensionnants pour l'ouvrage. En effet, les petits navires sont capables de manœuvrer facilement et d'éviter les appuis temporaires. De plus, ils ne sont pas dimensionnants pour l'intrados. Les navires lents peuvent également éviter les appuis temporaires et rejoindre le rail de navigation. Par ailleurs, une décomposition par trimestre s'est imposée compte tenu du grand volume des données à traiter pour l'ensemble de l'année 2016.

**Figure 3** Exemples de trajectoires fluviales linéaires



Source : Ifsttar

L'analyse statistique a donc nécessité de scinder l'ensemble des trajectoires linéaires en 32 groupes, en fonction des valeurs prises par les quatre facteurs suivants :

- la vitesse  $V$  du navire : constitution de deux modalités ( $V > 5$  nd et  $V > 10$  nd);
- le gabarit : deux modalités, petit gabarit lorsque la largeur du navire était inférieure à 10 m et gros gabarit dans le cas contraire;
- le sens de navigation : deux modalités (sens amont et sens aval).
- le trimestre de 2016 : constitution de quatre modalités.

### 2.3.3. Estimation d'un fuseau de trajectoires pour chaque catégorie

Pour chacun de ces 32 groupes, un modèle de régression linéaire a été identifié sur les coordonnées Lambert de toutes les trajectoires appartenant à la même modalité. Puis l'intervalle de prédiction à 95 % associé à ce modèle a été déterminé. Cet intervalle définit les limites entre lesquelles tomberait – dans 95 % des cas – la valeur  $\hat{y}_0$  d'ordonnée Lambert prédite par le modèle pour une nouvelle valeur  $x_0$  d'abscisse Lambert. Ce modèle permet de prédire les trajectoires des navires pour la modalité considérée. Cet intervalle de confiance est le fuseau des trajectoires.

En reprenant les notations précédentes, cet intervalle est défini par :

$$\left[ \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0 \pm t_{1-\alpha/2}^{n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left( 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)} \right] \tag{3}$$

où

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \tag{4}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \tag{5}$$

et  $t_{1-\alpha/2}^{n-2}$  est choisi dans la table de la loi de Student en fonction du niveau de confiance  $1 - \alpha = 95\%$  et du degré de liberté  $n - 2$ .

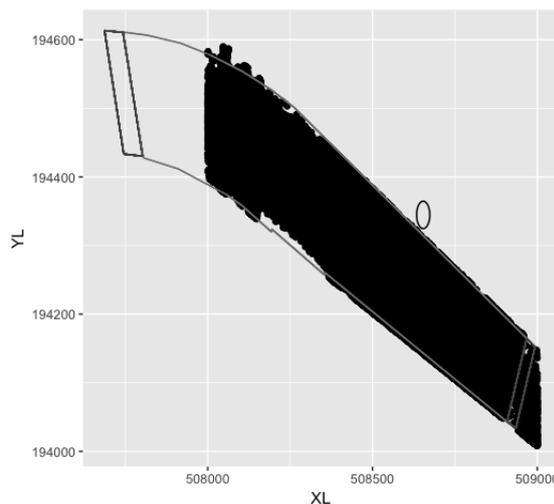
## 3. Résultats

Les figures présentées dans cette partie sont sur le même format que celles présentées dans la section précédente avec une représentation stylisée des deux ponts, des berges et de la tour panorama XXL.

La figure 4 illustre la totalité des trajectoires pour le premier trimestre de 2016. L'ensemble des trajectoires rectilignes recouvre toute la largeur de la Seine. Ce résultat n'apporte aucune réponse aux questionnements concernant le positionnement des appuis temporaires pendant la phase de travaux de la passerelle, ni sur la hauteur de l'intrados. Les résultats sont, ensuite, présentés selon la segmentation des données suggérée par la MRN, en fonction des vitesses et gabarits des navires. Sur ces figures ont été ajoutés la droite de régression (trait gras clair), ainsi que l'intervalle de prédiction à 95 % des trajectoires (parallélogramme grisé).

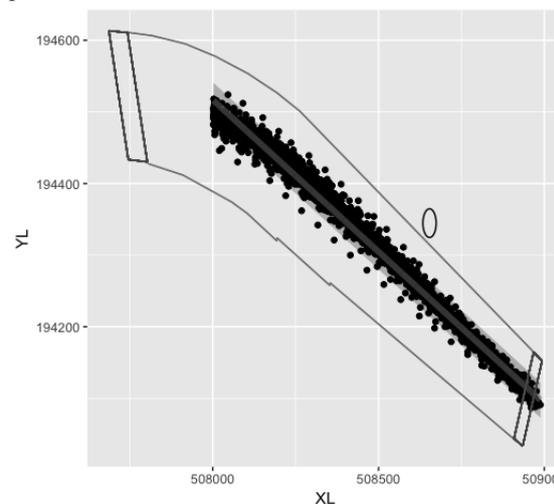
Ce quadrilatère est le fuseau des trajectoires déterminé par la méthode. Ceci permet d'estimer la portion du fleuve en pourcentage utilisé par le trafic pour les différentes modalités. Par la suite, seuls les résultats concernant les trajectoires orientées vers l'aval et enregistrées durant le premier trimestre de 2016 sont présentés – ces résultats étant similaires à ceux obtenus pour le sens amont et pour les autres trimestres.

**Figure 4** Totalité des trajectoires sur l'ensemble du premier trimestre de 2016



Source : Ifsttar

**Figure 5** Trajectoires des navires de petit gabarit naviguant à plus de 10 nd

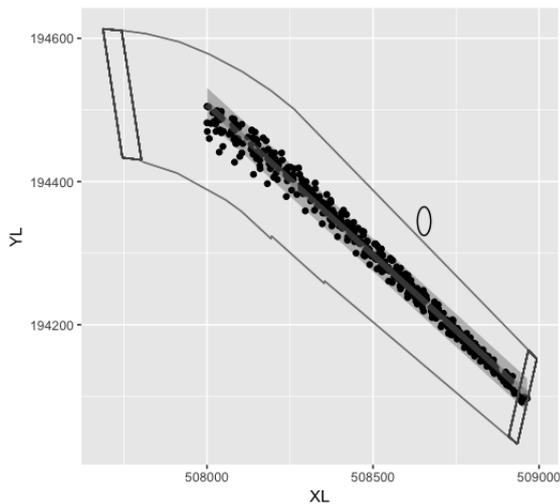


Source : Ifsttar

En première constatation visuelle, pour les vitesses élevées, il s'est avéré que le fuseau de trajectoires se

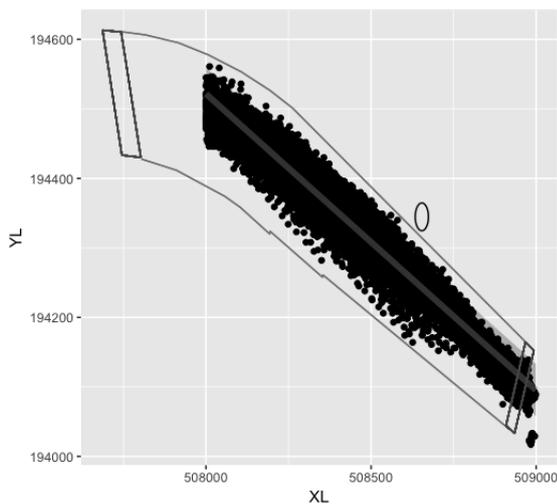
restreignait à une portion centrale du fleuve : cette portion était de l'ordre de 30 % pour les petits gabarits (fig. 5) et de 25 % pour les gros gabarits (fig. 6).

**Figure 6** Trajectoires des navires de gros gabarit naviguant à plus de 10 nd



Source : Ifsttar

**Figure 7** Trajectoires des navires de petit gabarit naviguant à plus de 5 nd

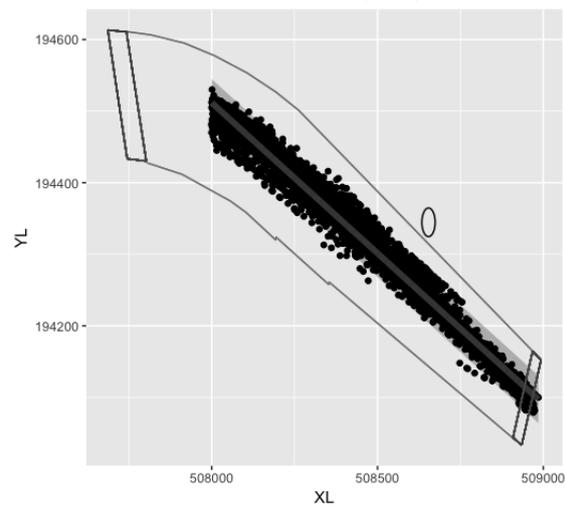


Source : Ifsttar

La situation était moins favorable aux contraintes d'implantation de la passerelle pour les faibles vitesses. En effet, les navires à petit gabarit occupaient environ 80 % de la surface de la Seine (fig. 7) et ceux à gros gabarit occupaient environ 60 % de la surface fluviale (fig. 8).

Un résultat secondaire est que la distinction entre gros gabarit et petit gabarit ne détermine pas la localisation des trajectoires des navires de manière aussi importante que la vitesse.

**Figure 8** Trajectoires des navires de gros gabarit naviguant à plus de 5 nd



Source : Ifsttar

Un résultat secondaire est que la distinction entre gros gabarit et petit gabarit ne détermine pas la localisation des trajectoires des navires de manière aussi importante que la vitesse.

## 4. Discussion

Les navires à gros gabarit qui sont sur des trajectoires à vitesses élevées n'occupaient que 25 % de la surface du fleuve. Ce fuseau est centré au milieu du fleuve. Ceci est une information précieuse pour l'implantation d'appuis pendant la période des travaux. Cela permet aussi de mieux concevoir l'intrados du pont.

Cependant, ce dernier point se base sur l'hypothèse sous-jacente d'une corrélation positive entre la largeur d'un navire et son tirant d'air. Ce point, important pour le dimensionnement de la passerelle, n'a pas pu être vérifié avec les données fournies, car celles-ci ne contenaient aucune d'information sur le tirant d'air des navires. C'est un point qui reste à confirmer par des experts en conception de navire.

La distinction entre les navires suivant leur vitesse répondait à l'hypothèse sous-jacente d'une différence de manœuvrabilité d'un navire en fonction de sa vitesse. Il a été constaté que les fuseaux des trajectoires pour

lesquelles la vitesse était supérieure à 10 nd étaient bien plus étroites que les fuseaux des trajectoires pour lesquelles la vitesse était moindre : ceci indiquait que plus le navire allait vite, plus sa trajectoire se rapprochait d'une trajectoire nominale rectiligne située au centre du fleuve, ce qui a conforté l'hypothèse initiale.

La distinction entre les navires à gros gabarit et petit gabarit répondait à l'hypothèse sous-jacente d'une différence de manœuvrabilité d'un navire en fonction de son gabarit. Il a été constaté que les fuseaux des trajectoires pour lesquelles le gabarit était important étaient plus étroits que les fuseaux des navires à petit gabarit. L'hypothèse initiale est confortée mais de manière moins tranchée que pour l'hypothèse sur la vitesse. C'est un résultat qui reste à analyser de manière plus approfondie.

En termes de méthodes statistiques, un simple modèle linéaire du Y Lambert en fonction du X Lambert a été présenté pour décrire les trajectoires des navires. D'autres méthodes ont été testées, comme par exemple l'inversion dans le modèle du X Lambert et du Y Lambert ou encore l'utilisation des moindres carrés totaux. Les résultats obtenus ont été sensiblement les mêmes. Aussi a-t-il été choisi de présenter la méthode la plus simple.

## 5. Conclusion

Les franchissements de fleuve sont des ouvrages d'art onéreux : il est fondamental de les dimensionner au mieux. Depuis quelques années, les navires sont géo-localisés et leurs trajectoires enregistrées. Dans cet article, une méthode utilisant cette masse de données disponibles est proposée afin d'aider au dimensionnement d'un ouvrage d'art. Tout d'abord, les navires qui naviguaient en ligne droite, c'est-à-dire qui n'étaient pas manœuvrants, ont été sélectionnés grâce à un modèle de régression linéaire et au calcul du coefficient de régression qui lui est associé.

Cette première sélection, uniquement statistique, n'est pas suffisante pour déterminer un fuseau de trajectoires exploitable par le maître d'ouvrage. Des informations fournies par des experts ont été ajoutées. Les trajectoires ont été segmentées selon les vitesses et les gabarits des navires. L'hypothèse sous-jacente à cette segmentation est que plus les navires sont grands et rapides, moins ils manœuvrent et plus ils se rapprochent d'une trajectoire nominale passant au centre du fleuve. Pour chacune des modalités de vitesse et de gabarit, un modèle linéaire de prédiction des trajectoires des navires a été identifié.

L'intervalle de prédiction à 95 % associé à ce modèle détermine le fuseau des trajectoires.

Les résultats ont confirmé l'hypothèse sous-jacente : les navires à gros gabarit, qui naviguaient au-delà de 10 nd, avaient une trajectoire rectiligne au centre du fleuve. Leur fuseau n'occupait qu'un quart de la surface du fleuve, ce qui constituait une information pertinente pour le maître d'ouvrage.

## Références

1. Matt DOWLE, Arun SRINIVASAN, Jan GORECKI et al. *Package data.table : Extension of data.frame*. Rapp. tech. version 1.10.4-3. R Project, 2017, 101 pages.
2. Abbas HARATI-MOKHTARI, Alan WALL, Philip BROOKS et al. « Automatic Identification System (AIS) : Data Reliability and Human Error Implications ». In : *The Journal of Navigation* 60 (2007), p. 373-389.
3. MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE. *Une décennie métropolitaine*. Rapp. tech. MRN, 2015, 66 pages.
4. Institut géographique NATIONAL. *Systèmes de projections*. Rapp. tech. IGN, 2009, 6 pages.
5. THE R PROJECT FOR STATISTICAL COMPUTING. <https://www.r-project.org>. 2016.
6. Hadley WICKHAM, Romain FRANCOIS, Lionel HENRY et al. *Package dplyr : A Grammar of Data Manipulation*. Rapp. tech. version 0.7.4. R Project, 2017, 73 pages.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au soutien de la Métropole Rouen Normandie.