
Analyse des empreintes guidée par un modèle de connaissances pour la compréhension des dynamiques de navigation maritime côtière

Wissame Laddada¹, Éric Saux²

1. Laboratoire d'informatique, du traitement de l'information et des systèmes
INSA Rouen, av. de l'université, F-76800 Saint-Etienne-du-Rouvray
wissame.laddada@univ-rouen.fr

2. Institut de recherche de l'École navale, École navale, BCRM Brest,
Lanveoc-Poulmic, CC 600, F-29240 Brest Cedex 9
eric.saux@ecole-navale.fr

RÉSUMÉ. *Les empreintes spatiales, historiques ou acquises en temps réel, aident à la compréhension des dynamiques de leurs porteurs. Dans un contexte de navigation maritime côtière, la recherche présentée montre la démarche de mise en place d'un modèle de connaissances visant à une analyse sémantique des empreintes de navires. Ce modèle est défini à partir des connaissances recueillies auprès d'experts du domaine complétées par des descriptions textuelles et graphiques. Après avoir décrit les principes de navigation, nous présentons les étapes menant à un tel modèle de connaissances. La recherche est complétée par la formalisation de règles portant sur la visibilité des points de repère. Enfin, un raisonnement conduit à inférer des connaissances supplémentaires de navigation sur lesquelles sont confrontées les empreintes de navigation afin d'identifier les routes ayant une sémantique pour le modèle et celles dénuées de sémantique.*

ABSTRACT. *The spatial footprints, historical or acquired in real time, help to understand the dynamics of their carriers. In a context of coastal maritime navigation, the research presented details the approach of setting up a knowledge model aimed at a semantic analysis of ship footprints. This model is defined on the basis of knowledge gathered from experts in this field, supplemented by textual and graphic descriptions. After having described these navigation principles, we present the stages leading to such a knowledge model. The research is completed by the formalization of rules relating to the visibility of landmarks. Finally, a reasoning leads to infer additional navigation knowledge on which the navigation footprints are confronted in order to identify the routes having semantics for the model and those devoid of semantics.*

MOTS-CLÉS : *logiques de description, navigation maritime côtière, ontologie, raisonnement.*

KEYWORDS: *Description logics, Coastal maritime navigation, Ontology, Reasoning.*

DOI:10.3166/RIG.31.111-133 © 2022 Lavoisier

1. Introduction

Étudier et analyser les dynamiques d'entités, de processus ou d'êtres vivants à partir de l'analyse des leurs empreintes spatiales, pour en extraire des informations ou des connaissances, a été de tout temps d'un grand intérêt pour la compréhension des phénomènes naturels ou non naturels (cyclones, désertification, déplacements migratoires, urbanisation, etc.) et des liens qu'ils entretiennent avec leur environnement. Les domaines d'intérêt et les applications sont multiples. Dans le cadre de cet article, nous nous limitons à l'analyse des dynamiques spatiales à partir de modèle de connaissances dans un contexte de navigation maritime côtière pour une application de sécurité maritime.

En préambule, il est important de rappeler la terminologie utilisée dans cet article et utilisée en représentation des connaissances. Une **donnée** est une description élémentaire d'une réalité : par exemple une observation ou une mesure effectuée. Deux catégories de données existent : les données brutes et les données (ou jeu de données ou data). Les données brutes n'ont été soumises à aucun traitement ou toute autre manipulation, alors que les données sont généralement le résultat d'un travail préalable sur les données brutes qui permettra de leur donner un sens. Les **informations** font références aux données porteuses de sens. Elles sont construites en fonction de règles et par interprétation des données d'un environnement précis. Enfin, une **connaissance** correspond à l'appropriation et l'interprétation des informations par des êtres humains. Elle peut être formalisée pour être utilisable à des fins opératoires. Le concept de connaissance fait appel aux questions de sens portées notamment par les notions telles que le langage, la sémantique, les croyances, la conscience. Pour passer des données à de l'information et enfin à une connaissance, il faut effectuer au préalable un traitement cognitif de ces données. Définir un **modèle de connaissances** revient donc à stocker les connaissances de sorte que des programmes puissent la traiter. Ceci sous-entend de i) définir des modèles formels permettant de représenter les connaissances, ii) traiter des informations au niveau sémantique et iii) simuler le raisonnement humain par le biais de mécanismes d'inférence. Les objectifs d'un modèle de connaissances sont donc de partager du savoir et de raisonner sur du savoir et ainsi permettre des analyses. C'est dans ce cadre que se situe cette recherche.

En modélisation des connaissances, deux approches peuvent être distinguées et être considérées comme complémentaires. La première approche de modélisation place l'humain au cœur du modèle (« *human driven* »). Ainsi, ses connaissances contenues dans des descriptions graphiques et linguistiques (textuelles et orales), issues d'une extériorisation de ses représentations mentales, elles-mêmes provenant d'une perception des environnements, sont à la source du modèle de connaissances. Cette approche est fortement cognitive et place l'humain à l'origine des connaissances du modèle. En conséquence, ce modèle est plus « proche » des attendus car il modélise des situations et des faits environnementaux qui sont connus et issus de l'homme. La seconde approche consiste à analyser et interpréter les données ou les empreintes (cf. article Fargette et *al.* de ce numéro thématique) afin d'en extraire une sémantique à modéliser. Cette seconde modélisation fait donc émerger une sémantique à partir des données

(« *data driven* ») et prend en considération les différents motifs qui émergent dans ces données. Ces deux modélisations sont complémentaires dans la mesure où la seconde permet de découvrir des inattendus, qui restent à expliquer. Dans cet article, nous montrons comment un modèle de connaissances, construit à partir des connaissances détenues par des experts et contenues dans des ouvrages, peut aider à la compréhension des dynamiques spatiales dans un contexte de navigation maritime côtière.

Dans cet article, nous abordons les différentes étapes entrant dans la définition d'un modèle de connaissances pour la navigation maritime côtière. L'objectif est ici de retranscrire la connaissance des experts en matière de définition de trajectoire maritime côtière au sein d'un système d'information pour que ce dernier puisse inférer des routes de navigation à partir des faits qui sont présents dans la base de connaissances. Deux stratégies d'exploitation des routes inférées peuvent être envisagées. L'une concerne leur exploitation au sein d'un système de routage pour proposer au navigateur des routes de navigation à suivre, l'autre concerne leur exploitation à des fins d'analyse des empreintes de positionnement de bateaux afin de capturer les portions ayant une sémantique pour le modèle et celles dépourvues de sémantique et sur lesquelles une analyse doit être approfondie. Nous optons pour cette seconde stratégie d'exploitation du modèle de connaissances.

Dans la section 2 de cet article, nous nous intéressons à l'extraction des connaissances de l'humain et à leur transcription dans un langage formel. Nous abordons l'étape de conceptualisation du domaine à partir de descriptions graphiques et textuelles réalisées par des experts et à leur formalisation en logique de description. Bien plus que de définir les concepts, nous montrons que ces descriptions peuvent aussi contribuer au peuplement de la base de connaissances. Dans la section 3, nous présentons sa modélisation ontologique en nous fondant sur le langage de représentation des connaissances OWL (*Web Ontology Language*) et le standard GeoSPARQL pour la modélisation de la dimension spatiale. Nous en déclinons les axiomes de notre ontologie à la base du raisonnement axiomatique. Afin d'enrichir le raisonnement, en prenant notamment en compte le processus de visibilité des repères liés à la navigation maritime, nous introduisons dans la partie 4 un raisonnement complémentaire fondé sur des règles SWRL. Enfin, la section 5 est consacrée à un premier niveau d'analyse sémantique pouvant être mené à partir du modèle de connaissances proposé. Nous concluons ensuite cet article et énonçons les perspectives envisagées et la complémentarité des approches numériques pour l'analyse sémantique.

2. De l'humain à la formalisation de ses connaissances

2.1. Extraction de la sémantique à partir de descriptions linguistiques et graphiques de navigation

Les recherches en théorie de l'information spatiale s'attachent depuis une cinquantaine d'années à l'étude des processus de navigation dans des environnements différents (urbain vs. naturel, fortement structuré vs. peu structuré) et à leur modélisation au sein de systèmes spatialisés. Modéliser, analyser et simuler des comportements

humains sont en effet des fonctions essentielles pour une meilleure compréhension de nos environnements et de nos interactions avec ceux-ci. Les descriptions linguistiques (écrites ou orales), graphiques ou mixtes (Przytula-Machrouh, 2004) constituent des données essentielles afin d'observer puis reproduire le plus fidèlement possible ces connaissances au sein d'un système d'information. Chacune de ces formes présente des particularités et des pouvoirs d'expression qui lui sont propres. Le mode linguistique est bien adapté à la description d'itinéraire ou d'environnement dans le sens où la linéarité et la chronologie d'un itinéraire se retrouvent dans le texte ou le discours. Dans ce genre de descriptions, les relations spatiales sont fortement usitées car elles permettent une meilleure appréhension de la spatialité par le positionnement des entités entre elles ou en lien avec l'itinéraire décrit. Les descriptions textuelles sont généralement plus riches et contiennent plus de descriptions d'entités que le mode oral plus simple. Les constructions linguistiques sont naturellement plus élaborées dans les textes que dans le langage oral. Le mode graphique a, quant à lui, le pouvoir de mieux inférer des relations spatiales sur les entités présentes et d'exprimer les différents déplacements à effectuer par rapport à ces entités. L'ensemble des entités statiques décrites est composé uniquement des entités les plus remarquables ou saillantes de l'environnement. Notons que la représentation graphique d'une dynamique de déplacement prend des formes relativement moins variées que celles des entités car elle se fait généralement à l'aide de flèches. Une simple flèche permet de définir le sens, l'orientation et parfois la taille (durée, distance) d'une action de déplacement.

La démarche adoptée pour aborder la problématique de modélisation des connaissances de la navigation maritime côtière a été d'analyser les descriptions textuelles et graphiques de tels déplacements. Ce type de navigation est appelé « navigation à vue » et est essentiellement fondée sur la notion de point de repère visuel ou « *landmark* », et est de ce fait en adéquation avec la problématique de « *wayfinding* »¹. La figure 1 illustre quelques exemples de descriptions graphiques. A gauche, le schéma présente les différents itinéraires pouvant être empruntés dans cette zone géographique côtière et est accompagné de descriptions textuelles (figure 2) complétant ce schéma. A droite, le schéma illustre un exemple théorique de préparation de route de navigation relative aux directives générales pour la conduite nautique (Marine nationale, 2005). Concernant les descriptions textuelles, les ouvrages du SHOM intitulés « Instructions nautiques » (IN) (SHOM, 2018) ou les guides de navigation tels que les « Pilotes côtiers » (Voiles et voiliers, 2006) (figure 2) contiennent des informations d'une grande richesse sur l'environnement maritime et côtier, souvent complémentaires aux descriptions graphiques ou cartographiques, pour répondre aux besoins des navigateurs professionnels, tout en fournissant aux plaisanciers l'information qui leur est nécessaire. Les descriptions des Pilotes côtiers, plus en lien à la navigation à vue, ont l'avantage – par rapport aux IN – de décrire la chronologie d'un itinéraire dans différents contextes (jour/nuit, bonne/mauvaise visibilité ou conditions météorologiques)

1. « Le *wayfinding* décrit le processus pour effectuer une trajectoire englobant optimisation et raisonnement spatio-temporels tout en prenant en considération notre interaction avec l'environnement qui nous entoure et influence notre itinéraire. », extrait de (Laddada, 2018).

et de décrire les relations spatiales entre différentes entités ce qui en fait notre source de connaissances prioritaire. Moins contemporains, les nombreux ouvrages littéraires anciens sont aussi une source d'information. Certains relatent les principes de navigation à l'aide de connaissances scientifiques et quantitatives d'Eratosthène ou selon la géographie de Strabon dans laquelle les descriptions à la fois cartographique et textuelle (cf. les anciennes cartes nautiques dites « portulans ») servent de support aux marins grecs qui corrélaient la perception visuelle des repères terrestres aux descriptions objectives et intègres de la carte afin de confirmer – ou non – leur positionnement géographique et la validité de leur itinéraire (Kowalski, 2009).

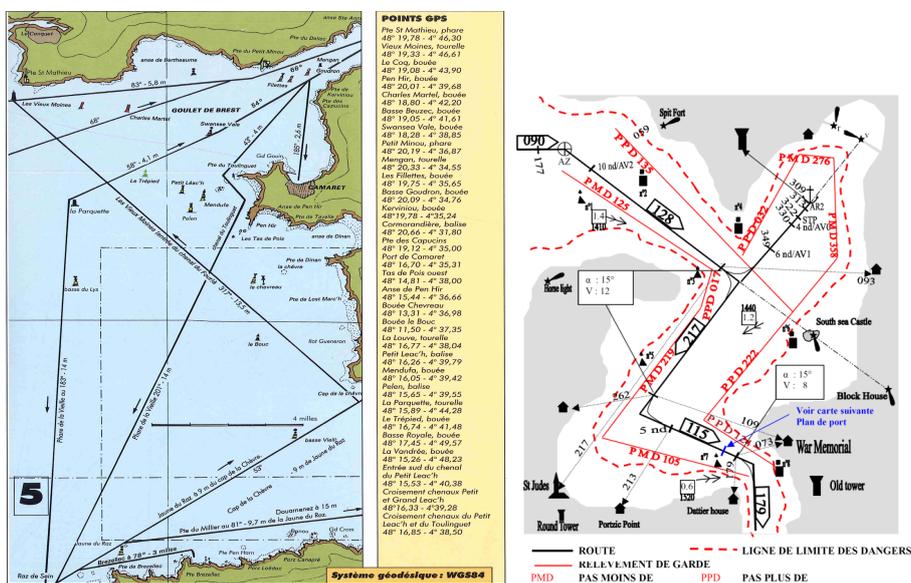


Figure 1. Exemples de routes de navigation : cartographie extraite des Pilotes côtiers (à gauche), préparation de routes de navigation suivant les directives générales pour la conduite nautique (à droite)

En venant du chenal du Four, on peut virer la pointe St-Mathieu au plus près en laissant sur bâbord le feu rouge (éclat 4 sec.) visible de 280° à 113° de la tourelle des Vieux Moines, puis le feu rouge (4 éclats 15 sec.) de la bouée à sifflet Charles Martel que rase l'alignement lumineux à 68°.

En se rapprochant du feu du Petit Minou, on s'écartera de cet alignement à 68° pour laisser à petite distance sur tribord le feu blanc scintillant rapide (9) 10 sec. de la bouée à sifflet du plateau des Fillettes et le feu également blanc (3 éclats 12 sec.) de la tourelle de Mengan. On notera que ce dernier feu couvre d'un étroit secteur rouge (34° à 54°) la bouée de la basse Goudron qui montre un feu rouge scintillant.

En passant à la hauteur du feu de Portzic, on peut faire route directement vers les feux scintillants rouge et vert balisant la passe d'entrée sud de la rade abri du port de Brest.

Figure 2. Texte extrait des Pilotes côtiers et décrivant l'entrée de nuit dans le goulet de Brest. Ce texte est complété par la description graphique de la figure 1 (à gauche)

L'analyse des descriptions linguistiques textuelles et graphiques nous a permis d'identifier les entités impliquées dans la recherche d'itinéraire dans le contexte de navigation maritime côtière ainsi que les dépendances spatiales et temporelles existantes. Dans l'étape de conceptualisation, nous définissons les concepts de Trajectoire, Route, Amer, WayPoint, PointDeDépart, PointD'Arrivée ainsi que les relations entre deux concepts ou entre un concept et une valeur littérale. Dans ce contexte de navigation, nous montrons l'influence de la dimension temporelle (de jour, de nuit) ainsi que l'influence de la dimension spatiale par l'utilisation des primitives géométriques de base (point, ligne, polygone, ensemble de points, de lignes ou de polygones) et des relations topologiques, d'orientation et de distance. Dans cette analyse, nous montrons aussi l'importance de la modélisation sémantique de la visibilité – d'un ou des amer(s)² –, cette dernière étant soumise à la fois aux influences spatiales (problème d'inter-visibilité) et aux influences temporelles (présence d'un feu sur l'amer de nuit). Suite à cette première analyse, il en résulte l'identification des concepts et relations nécessaires à une modélisation d'itinéraire. Cette étude a été complétée par une étape de formalisation (cf. partie 2.2) visant à raisonner sur ces connaissances afin d'offrir au système des capacités à inférer de nouvelles connaissances (cf. partie 3).

Cette première étape d'analyse des descriptions linguistiques textuelles et graphiques a été, par la suite, complétée par une étape d'extraction des entités spatiales nommées (ESN) à partir d'outils de traitement automatique des langues (TAL). L'objectif est ici d'extraire automatiquement les instances des concepts identifiés lors de l'étape de conceptualisation, ceux-ci étant nécessaires pour le peuplement de l'ontologie résultante. En lien avec l'étude proposée par Lamotte (Lamotte *et al.*, 2019) et qui montre que la particularité des textes des IN (SHOM, 2018) mettent à défaut les approches usuelles en TAL telles que les approches proposées par Perdido³ et CasEN⁴, Lamotte met en place sa propre chaîne d'extraction des ESN à partir de l'outil Unitex⁵. Elle reprend le principe proposé par les auteurs et fondé sur les deux cascades de transducteurs « analyse » et « synthèse » telles que développées dans (Maurel *et al.*, 2011), mais elle définit des graphes d'analyse spécifiques pour annoter les ESN de l'environnement maritime et côtier nécessaires à la navigation en vue de terre. Un exemple résultat est proposé dans la figure 3, dans laquelle sont annotés les entités maritimes et côtières (typées et nommées), les marques de navigation (typées, nommées et géoréférencées) ainsi que les alignements.

2. Objet proéminent à un emplacement fixe qui peut être utilisé pour déterminer un emplacement ou une direction (définition extraite de la norme S-57 de l'Organisation Hydrographique Internationale).

3. Service Web développé par L. Moncla lors de sa thèse (Moncla, 2015). <http://erig.univ-pau.fr/PERDIDO/api.jsp>

4. Outil développé au Laboratoire d'Informatique Fondamentale et Appliquée de Tours (LIFAT). <https://tl.lifat.univ-tours.fr/version-francaise/ressources/casen>

5. Outil proposé par le Laboratoire d'Informatique Gaspard-Monge. <https://unitexgramlab.org/fr>

La ligne joignant la `<maritimeEntity><name><type>pointe</type>` du Toulinguet</name></maritimeEntity> au sud à la `<maritimeEntity><name><type>bouée</type>` Charles Martel</name></maritimeEntity>, en lisière de l'`<leadingLine type="avant" subtype="name">alignement à<Mesure type="orientation">68</Mesure>` du `<name>grand chenal</name></leadingLine>` à 3,8 milles avant le `<maritimeEntity><name><type>phare</type>` du Petit Minou</name></maritimeEntity>, marque le début de la zone de pilotage où les navires de plus de 50 m ont une totale priorité de manœuvre. Une veille doit en outre être assurée sur canal 16 en VHF.

À l’approche du goulet, le `<maritimeEntity><name><type>phare</type>` de la `<maritimeEntity><name><type>pointe</type>` du Petit Minou</name></maritimeEntity></name></maritimeEntity> accolé à une tour blanche donne avec le `<maritimeEntity><name><type>phare</type>` de Portzic</name></maritimeEntity>, une tour élanée sur la pointe à gauche de l’entrée dans la rade, l'`<leadingLine type="avant" subtype="name">alignement à<Mesure type="orientation">68</Mesure>` du `<name>grand chenal</name></leadingLine>`. De jour, il n’est pas nécessaire de suivre exactement cet alignement car il ne manque pas d’eau à courir pour un voilier.

POINTS GPS :

```
<navigationMark type="bouée"><name>Charles Martel</name>, bouée<location><lat>48
18,80</lat> <lon>4° 42,20</lon></location></navigationMark>
<navigationMark type="phare"><name>Petit Minou</name>, phare<location><lat>48° 20,19</lat>
<lon>4° 36,87</lon></location></navigationMark>
```

Figure 3. Annotation automatique des entités nécessaires à la navigation maritime côtière : entités maritimes et côtières (en gris clair), marques de navigation géoréférencées (en gris foncé) et alignements (en gris moyen)

L’analyse des descriptions linguistiques textuelles a permis également d’extraire la sémantique d’un concept liée à son affordance⁶ (Tsatcha *et al.*, 2012). La technique proposée permettant d’extraire – à partir de données textuelles nautiques – des connaissances liées à l’affordance d’un concept est fondée sur le principe du vecteur conceptuel d’un mot. Le vecteur conceptuel d’un mot s’obtient à partir des synsets candidats liés à ce mot. Ce vecteur conceptuel de mot a permis de construire le vecteur conceptuel d’une phrase exprimé comme une somme directe des vecteurs conceptuels des différents mots qui la compose. Les phrases utilisées sont celles qui décrivent le concept dans le corpus. Une fois les vecteurs conceptuels de ces phrases déterminés, ceux-ci sont projetés dans un espace de décision formé des vecteurs conceptuels des affordances, par exemple les affordances « maneuver, stop, continue, back » – dans les cas traités lors de l’étude – afin de savoir si un bateau doit manœuvrer, stopper, continuer ou faire machine arrière face un objet de l’environnement maritime. Ces affordances sont couramment utilisées par les marins pour modifier la trajectoire du navire. L’espace de décision fait alors émerger une des affordances. Cette possibilité de déterminer l’affordance procure au modèle la capacité de pouvoir fabriquer ou de déduire lui-même sa propre connaissance et ainsi de prendre des décisions raisonnables en toute autonomie. L’affordance ainsi produite est désignée par une propriété (hasAffordance) qui fait partie de l’une des propriétés des états d’une entité définie dans l’ontologie.

6. L’affordance, néologisme proposé par le psychologue américain James Jerome Gibson, traduit fidèlement cette faculté de l’homme, et de l’animal en général, à guider ses comportements en percevant ce que l’environnement lui offre en termes de potentialités d’actions.

2.2. *De la conceptualisation des connaissances à leur formalisation en logique de description*

Nous avons évoqué dans les parties précédentes, l'importance d'analyser des descriptions représentant le processus de navigation dans un environnement donné pour en extraire de la connaissance. Dans ce contexte, le modèle résulte de différentes étapes d'analyse pour une conceptualisation des entités de navigation. Une fois la conceptualisation réalisée, une formalisation des concepts est proposée afin d'offrir au modèle une capacité de raisonnement.

2.2.1. *Conceptualisation des entités de navigation*

Dans l'optique de planifier une trajectoire de navigation en milieu maritime, il faut tenir compte des concepts sur lesquels se fonde la navigation dans cet environnement. Nous nous sommes concentrés sur la navigation côtière (c.-à-d. en vue de terre) fondée sur les repères ou amers. Ces derniers sont exploités pour que les marins puissent suivre un chemin sécurisé jusqu'à leur destination finale. Afin d'explicitier les notions adoptées dans une navigation, nous nous sommes fondés sur les « Instructions nautiques » du SHOM ou les guides de navigation tels que « Pilote côtier » (cf. partie 2.1) mais aussi sur des exemples de descriptions textuelles de marins expérimentés qui représentent une préparation de traversée, dont un extrait est présenté ci-après :

Description 1 : Départ du port de Brest. Route au 254 pour 3.13 Nq. La route est sur un relèvement constant par l'avant sur le phare du Petit Minou.

Description 2 : Route au 191 pour 2.2 Nq. sur l'alignement du phare du Petit Minou par le rocher en forme de chaise de la pointe du Toulanguet.

Etc.

Dans le but d'atteindre une destination, le navigateur doit suivre une trajectoire qui est constituée d'une séquence de routes maritimes. Chacune de ces routes suit un cap tracé sur un repère donné. Ce dernier doit ainsi être visible à partir du bateau. L'objectif premier consiste donc à identifier les principes et les termes employés – dans les descriptions textuelles (cf. partie 2.1) – afin de les intégrer dans une conceptualisation telle que présentée dans ce qui suit.

Une **trajectoire (Trajectory)** est constituée d'une séquence de **routes** successives.

Une **route (Route)** correspond à un **segment** orienté sur un **cap**. Celui-ci est à 254° dans la *Description 1* et à 191° dans la *Description 2*. Le bateau suit ce cap durant une période de temps correspondant à la durée de la traversée sur cette route.

Un **WayPoint** représente un point clé de la trajectoire. Il peut décrire un **point de départ**, un **point d'arrivée** ou un **point de décision**. Chaque **point de décision** de la trajectoire marque le début de la prochaine route et la fin de la route courante. Un point de décision marque le point où un navigateur décide de changer de **cap** et donc de changer de route. Le cap désigne donc l'orientation du navire exprimée en degré. C'est notamment à partir d'un point de décision que les notions de visibilité et de perception des **repères** de l'environnement (amers) jouent un rôle important.

Un **Amer (NavigationMark)** représente un **point** de repère et d'orientation pour fixer un **cap** et définir ainsi une **route**. Un repère a certaines propriétés dues à sa **saillance visuelle** qui peut le distinguer des autres éléments de l'environnement. Comme exemple d'amers, on peut citer les phares, les balises, les roches, etc. Dans les descriptions précédentes, les amers correspondent au « *phare du Petit Minou* » et au « *rocher en forme de chaise de la pointe du Toulinguet* ».

Un **relèvement (Bearing)** correspond à une orientation sur un **amer**, ce qui définit un **angle** formé à partir du bateau entre cet amer et la direction du Nord géographique. Dans la *Description 1*, la **route** suit un **relèvement** à 254° (par l'avant du bateau) sur le phare du Petit Minou.

Un **alignement (LeadingLine)**, comme son nom l'indique, est un concept qui aligne au moins deux amers. Ce concept est représenté par une **ligne** qui forme un angle avec le Nord géographique. Dans la *Description 2*, la **route** suit un **alignement** de 191° formé par le phare du Petit Minou et le rocher en forme de chaise de la pointe du Toulinguet.

Cette première étape, nous permet d'identifier les entités et les dépendances existantes entre elles afin de faciliter la modélisation ontologique qui fait l'objet de la deuxième étape (cf. partie 3). Entre ces deux étapes, une formalisation est nécessaire afin de déterminer l'émergence des dépendances. Suite à une analyse graphique des concepts, la dimension spatiale est incluse dans la formalisation ainsi que la notion sémantique liée à la visibilité. Ceci offre la possibilité d'avoir une modélisation formelle qualitative qui favorisera le mécanisme de raisonnement.

2.2.2. Formalisation des concepts

Nous avons choisi de formaliser les concepts et relations à partir des logiques de description (DL). Les raisons sont multiples. Tout d'abord, et d'après Baader (Baader *et al.*, 2010), les systèmes fondés sur les logiques de description offrent un service de raisonnement sur les prédicats définis (concepts et relations). Ainsi dans l'étape de modélisation ontologique (cf. partie 3), nous pourrions interpréter nos expressions sémantiques avec le langage ontologique OWL (*Ontology Web Language*) – ce dernier étant lui-même fondé sur DL – et ainsi mettre en œuvre un raisonnement axiomatique. L'intérêt d'une formalisation en DL est aussi de pouvoir déployer un modèle avec deux niveaux d'inférence : i) un raisonnement axiomatique, et ii) un raisonnement à base de règles. En effet, il est possible d'ajouter des règles à notre système afin d'enrichir le raisonnement et la sémantique sur les instances de notre base de connaissances. Ces règles seront formalisées en SWRL (langage de règles pour le web sémantique). Nous présentons dans le tableau 1 (Laddada, 2018), les différents concepts formalisés constituant les entités du raisonnement axiomatique. Le raisonnement à base de règles sera quant à lui détaillé dans la partie 4.2.

Dans cette formalisation, les concepts atomiques désignent les concepts qui n'ont pas de définition axiomatique complexe mais une simple définition hiérarchique. A ce titre, le concept *NavigationMark* représente un amer et est désigné par un point

Tableau 1. Formalisation des concepts

Concepts atomiques	Concepts axiomatiques en DL
$OriginPoint \sqsubseteq Point$	$WayPoint \equiv Point \sqcap (DeparturePoint \sqcup DecisionPoint \sqcup DestinationPoint)$
$DeparturePoint \sqsubseteq OriginPoint$	$VisibilityLine \equiv Line \sqcap \exists contains. OriginPoint \sqcap \exists Contains. (NavigationMark \sqcap \exists visibleFrom. OriginPoint) \sqcap \exists hasBAngle. Angle$
$DestinationPoint \sqsubseteq OriginPoint$	
$DecisionPoint \sqsubseteq OriginPoint$	$Bearing \equiv Line \sqcap \exists equals. (VisibilityLine \sqcap = 1 contains. NavigationMark)$
$NavigationMark \sqsubseteq Point$	$LeadingLine \sqsubseteq Line \sqcap \geq 2 contains. NavigationMark$
$Horizon \sqsubseteq Circle$	$DecisionPoint \equiv Point \sqcap \exists within. ((VisibilityLine \sqcap LeadingLine) \sqcup (LeadingLine \sqcap LeadingLine) \sqcup (VisibilityLine \sqcap VisibilityLine))$
$VisibilityLightDistance \sqsubseteq Circle$	$Route \equiv Line \sqcap \geq 2 contains. WayPoint \sqcap \exists within. (Bearing \sqcup LeadingLine)$
$VisibilityWeather \sqsubseteq Circle$	$Trajectory \equiv LineString \sqcap \exists Contains. DeparturePoint \sqcap \exists Contains. DestinationPoint \sqcap \geq 1 Contains. Route$

dans un espace 2D grâce aux coordonnées géographiques (latitude, longitude). Un amer est un point de repère fixe et identifiable sans ambiguïté pour la navigation maritime. Ainsi, pour chaque amer, lui est associé une zone de visibilité dans l'espace : visibilité à l'horizon représentée par le concept *Horizon*, visibilité de son feu – s'il y a – définie par le concept *VisibilityLightDistance* et visibilité selon les conditions météorologiques définie par le concept *VisibilityWeather*. Chacun de ces concepts est représenté géométriquement par un cercle. La vérification de la visibilité d'un amer est réalisée à partir d'un point d'observation défini dans notre modèle par le concept *OriginPoint*. Ce dernier inclut le point de départ (*DeparturePoint*), le point d'arrivée (*DestinationPoint*) et les points de décision (*DecisionPoint*) qui constituent les points de réorientation dans la trajectoire.

3. Modélisation ontologique pour le raisonnement

Le principe de l'approche ontologique, sur lequel nous nous appuyons, est fondé sur le fait que chaque concept impliqué dans la représentation d'une trajectoire est associé à une primitive géométrique comme défini dans la formalisation ci-avant. Ainsi, l'ontologie doit prendre en considération la dimension spatiale et les concepts définis pour une trajectoire. Pour ce faire, nous interprétons en OWL tous les concepts listés précédemment pour la définition formelle d'une trajectoire de navigation maritime côtière et de ses composants. Dans la suite de cette partie, nous présentons la modélisation ontologique que nous proposons en nous fondant sur des ontologies publiées, notamment pour la modélisation de la spatialité. La modélisation globale est donc

constituée de deux ontologies principales ; l'une est définie par nos soins et s'appuie sur une autre modélisation spatiale existante fondée sur le standard de GeoSPARQL. Nous complétons ensuite cette modélisation initiale afin de prendre en compte la modélisation ontologique du concept de visibilité. Par le biais de cette modélisation ontologique, nous abordons les questions liées à l'inférence et au fait que le système puisse déduire de nouvelles connaissances à partir de connaissances initiales. Cependant un raisonnement axiomatique, à lui seul, n'est pas suffisant pour inférer l'ensemble des concepts et notamment les concepts de visibilité. C'est la raison pour laquelle nous enrichissons la sémantique initiale avec des règles SWRL (*Semantic Web Rule Language*).

3.1. Modélisation ontologique de la dimension spatiale

Afin de construire notre ontologie, nous reprenons un modèle ontologique existant pour la représentation de la dimension spatiale à savoir, l'ontologie fondée sur le standard GeoSPARQL⁷. C'est un standard de représentation et d'interrogation des données géospatiales dans le contexte du web sémantique et des données liées. Ce modèle est organisé en trois classes principales : *Geometry*, *Feature* et *SpatialObject* (figure 4). La classe *SpatialObject* est décrite par les deux classes *Geometry* et *Feature*. La classe *Feature* représente une entité spatiale dans un environnement donné, par exemple un phare. La classe *Geometry* recense toutes les formes géométriques définies par l'*Open Geospatial Consortium* (OGC), dont les points, les polygones et les polygones.

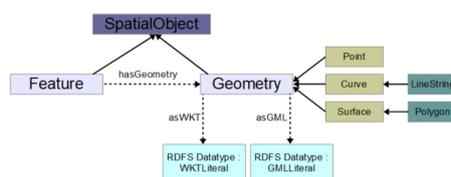


Figure 4. Modèle ontologique du standard GeoSPARQL

Les relations dans ce modèle comprennent principalement le vocabulaire des relations topologiques définies dans les modèles 9-intersections (Egenhofer, Herring, 1990) ou RCC8 (Randell *et al.*, 1992) ainsi que d'autres relations telles que *hasGeometry*, qui relie la classe *Feature* à la classe *Geometry*, ou la relation des données *hasSerealization*. Cette dernière réunit les deux sous-relations de données développées par l'OGC : *asWKT* (*Well-Known Text*) et *asGML* (*Geography Markup Language*). La première sous-relation *asWKT* est relative au format standard utilisé afin de décrire les objets géométriques vectoriels et les systèmes de coordonnées. La seconde sous-relation *asGML* permet de présenter et de manipuler des informations géographiques dans un langage XML. Dans la perspective d'obtenir une modélisation onto-

7. <http://www.opengis.net/ont/geosparql#>

logique d'une trajectoire de navigation maritime côtière, nous étendons l'ontologie de GeoSPARQL en enrichissant la classe *Feature* avec les concepts de trajectoire.

3.2. Modélisation ontologique d'une trajectoire de navigation côtière

En navigation maritime côtière, une trajectoire de navigation suit une séquence de repères définis comme étant des instances de *Point* dans la formalisation. Selon le modèle de GeoSPARQL, un repère (*NavigationMark*) est une entité spatiale qui doit être une sous-classe de *Feature*. Ainsi, nous interprétons le fait qu'un repère soit un *Point* par la relation *hasGeometry* qui lie une entité spatiale à un point. Plus précisément, un objet spatial dans le monde réel est associé à une géométrie dont les coordonnées géographiques sont décrites par le format WKT. Comme le décrit la figure 5, le « *Phare du Petit Minou* » est de type *NavigationMark* qui est une sous-classe de *Feature*. Ce phare a un point comme forme géométrique qui est décrite par l'instance *Point354*. Ainsi, le « *Phare du Petit Minou* » et la géométrie *Point354* sont deux individus reliés par la relation *hasGeometry*. L'individu *Point354* a ses coordonnées géographiques définies par un littéral qui est l'objet de la relation *asWKT*.

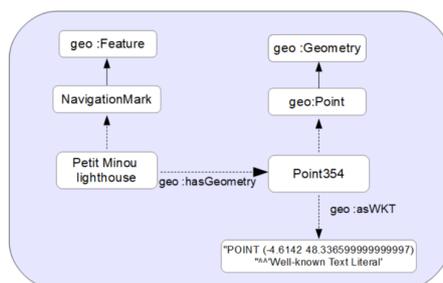


Figure 5. Exemple de représentation de l'entité spatiale « *Phare du Petit Minou* »

Le même principe de modélisation est appliqué à chaque concept d'une trajectoire afin de lui associer une dimension spatiale (figure 6) (Laddada, 2018). Ainsi :

- Chaque *WayPoint* est de type *Feature* et a un *Point* comme géométrie avec des coordonnées géographiques. Il en est de même pour le concept *OriginPoint*.
- Une trajectoire (*Trajectory*) est de type *Feature* et a pour géométrie une ligne polygonale (*LineString*) dont chacun de ses points a des coordonnées géographiques.
- Une route (*Route*) est également de type *Feature* avec une ligne comme géométrie (*Line*) décrite par des coordonnées géographiques.
- Un relèvement (*Bearing*) est de type *Feature* qui a une ligne comme géométrie (*Line*) avec des coordonnées géographiques.
- Un alignement (*LeadingLine*) est de type *Feature* avec une ligne comme géométrie comme pour le relèvement.

Afin de modéliser la notion d'orientation pour représenter un cap ou un angle de relèvement, la classe *Angle* est définie. Un angle est lié à la ligne décrivant un relèvement

(*Bearing*) par la relation *hasBAngle*. Une propriété de données nommée *hasAngleValue* de type *Float* est introduite pour représenter la valeur de l'angle d'orientation.

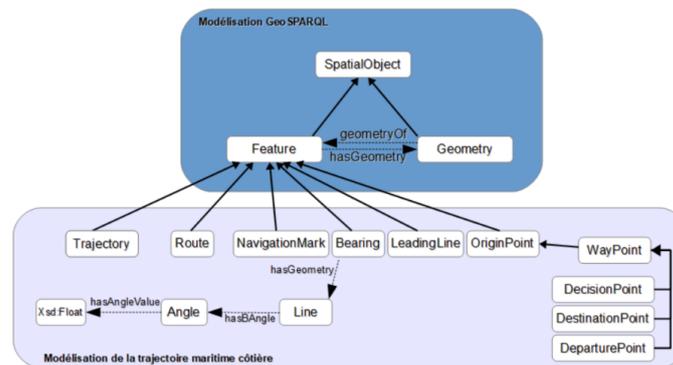


Figure 6. Vue partielle du modèle ontologique de navigation maritime côtière et de ses composants

3.3. Raisonnement axiomatique

Afin de peupler l'ontologie, nous avons extrait automatiquement (cf. figure 3) et manuellement des connaissances à partir des données quantitatives des cartes maritimes du SHOM au format S-57⁸ et des données qualitatives textuelles (Instructions nautiques du SHOM, Pilotes côtiers, etc.). Dans notre ontologie, nous avons fait le choix d'instancier manuellement les alignements et d'instancier automatiquement les *DecisionPoint* à partir d'un algorithme de subdivision de l'espace maritime. Un exemple d'instanciation du modèle à partir de la *Description 1* « Départ du port de Brest. Route au 254 pour 3.13 Nq. La route est sur un relèvement constant par l'avant sur le phare du Petit Minou. » peut être la suivante. Un *Feature*, *Feature1*, est défini dans l'ontologie avec une géométrie, *Line1*. Cette ligne est associée à *Feature1* grâce à la relation *hasGeometry*. Cette ligne est formée par deux points, *PointA* et *Point562*, représentant respectivement les géométries du *Port de Brest* (de type *DeparturePoint*) et du premier point de décision, *DecisionPoint1*. De plus, la relation topologique *contains* associe *Line1* à ces deux points. L'amer, *Petit minou*, de type *NavigationMark* est également défini avec sa géométrie *Point364*. Par ailleurs, une autre ligne, *Line6*, est déterminée décrivant la ligne de visibilité, *VisibleLine1* (*VisibleLine1 hasGeometry Line6*). Cette dernière ligne est formée par le point de départ (*PointA*) et le point *Point364*. La relation spatiale entre la ligne et les deux points *PointA* et *Point364* est introduite dans l'ontologie par la relation topologique *contains*. Ensuite, nous identifions la relation topologique *within* entre les lignes *Line1* et *Line6*.

8. <http://www.s-57.com/>

Le model formel, que nous avons proposé dans le tableau 1, est interprété en s’aidant de la syntaxe Manchester OWL (Horridge *et al.*, 2006). Nous décrivons dans le tableau 2 les axiomes que nous définissons dans l’ontologie grâce à l’éditeur d’ontologie Protégé. En tenant compte des formalisations listées dans le tableau 2, nous remarquons que le concept *LeadingLine* a une formalisation que nous n’adaptions pas dans notre application ontologique (pas de définition en Manchester OWL). Il en est de même pour le concept *DecisionPoint*. La non-application de ces deux formalisations est relative au raisonnement. Les individus instanciant le concept **LeadingLine** ne sont pas inférés mais peuplés manuellement, alors que l’instanciation du concept *DecisionPoint* est automatique à partir d’un processus de subdivision de l’espace.

Au-delà de l’intérêt d’utiliser des ontologies pour la structuration et le partage de données en utilisant des vocabulaires communs, les ontologies informatiques répondent aussi à des besoins de raisonnement. Le modèle ainsi proposé et interprété dans le tableau 2 répond alors au besoin de proposer des routes de navigation maritime qui respectent la sémantique du modèle. Il est par conséquent apte à inférer des *waypoints*, des relèvements, des routes et des trajectoires.

Tableau 2. Axiomes de l’ontologie en syntaxe Manchester OWL

<i>VisibleLine EquivalentTo Feature and (hasGeometry some (Line and (contains some (Point and (geometryOf some NavigationMark)))) and (contains some (Point and (geometryOf some OriginPoint)))) and (hasBAngle some Angle)</i>
<i>Bearing EquivalentTo VisibilityLine and (hasGeometry some (Line and (contains max 1 (Point and (geometryOf only NavigationMark)))) and (visibilityStm value true)</i>
<i>Route EquivalentTo Feature and (hasGeometry some (Line and (within some (Line and (geometryOf some (Bearing or LeadingLine)))) and (contains min 2 (Point and (geometryOf some WayPoint))))</i>
<i>Trajectory EquivalentTo Feature and (hasGeometry some ('Line String' and ((contains some (Line and (geometryOf min 1 Route)) and (contains some (Point and (geometryOf some DeparturePoint)) and (contains some (Point and (geometryOf some DestinationPoint))))))</i>

Notons que dans la formalisation (cf. tableau 1), les éléments d’une trajectoire sont des sous-concepts d’une géométrie. En théorie, il suffit donc d’appliquer les relations topologiques directement sur ces éléments. En revanche, la modélisation ontologique est fondée sur le standard de GeoSPARQL dans lequel les éléments d’une trajectoire ne sont pas des sous-classes d’une géométrie mais sont reliés à une géométrie par la relation *hasGeometry*. Afin d’appliquer les relations topologiques sur les éléments, nous devons donc nous référer à leur description géométrique grâce à la propriété *hasGeometry*. Le raisonnement s’appliquant explicitement sur la forme géométrique, il est impératif pour le mécanisme de raisonnement de savoir à quel élément de la trajectoire la géométrie fait référence. Il en résulte l’importance de la définition de la relation *geometryOf*, inverse de la relation *hasGeometry*. Cette relation est définie pour faciliter l’annotation de la formalisation vers l’ontologie, mais il est tout à fait possible d’utiliser aussi la relation inverse *hasGeometry*⁻¹.

4. Enrichissement sémantique relatif à la visibilité des repères

Dans cette partie, nous abordons la problématique relative à la sélection des amers grâce à des critères de visibilité et non pas grâce à des critères de saillances visuelles. En d'autres termes, la perspective ici est de sélectionner les repères visibles à partir d'un point de vue (celui du bateau ou du marin) et qui contribue à la définition d'une route sans danger et ainsi à la génération d'une trajectoire à suivre. En revanche, les questions liées à la saillance des repères – choix d'un repère ayant une forme ou une couleur différente de l'environnement dans lequel il se trouve – ne sont pas abordées ici. Dans notre étude, les repères (*NavigationMark*) sont connus grâce à la couche thématique des « *Landmarks* » – ayant pour acronyme LNDMRK – présente dans les données spatiales au format S-57. L'utilisateur peut compléter cette liste par ses propres repères (avec leur coordonnées géographiques) issus de son expérience. Afin que le système puisse sélectionner des repères, il est nécessaire d'étendre le modèle ontologique défini précédemment afin de prendre en compte la notion de visibilité d'un repère à partir d'un point d'observation.

4.1. Modélisation ontologique de la visibilité des repères

L'idée élaborée est d'inférer des zones de visibilité pour des amers à partir d'un point d'observation en prenant en compte les paramètres influençant la visibilité, c'est-à-dire la rotondité de la terre, les conditions météorologiques (bonne ou mauvaise visibilité) et les différents moments de la journée (visualisation de jour ou de nuit). Ces zones de visibilité sont décrites comme des cercles dans la formalisation (cf. tableau 1) par les concepts *Horizon*, *VisibilityWeather* et *VisibilityLightDistance* (respectivement *VHorizon*, *VWeather* et *VLight* dans le modèle ontologique). Chaque cercle, dont son centre est associé à un amer, est délimité par un rayon définissant la distance à laquelle le repère est visible.

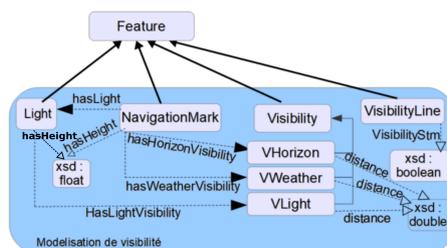


Figure 7. Enrichissement de l'ontologie pour la prise en compte de la notion de visibilité

Chacun de ces trois concepts est indirectement une sous-classe de l'entité *Feature* de GeoSPARQL. Plus précisément, une classe nommée *Visibility* est définie comme une sous-classe directe de *Feature* et inclut les trois concepts de visibilité. La figure 7 (Laddada, 2018) illustre cet enrichissement conceptuel. La hiérarchie développée est une conséquence du fait que la visibilité est modélisée par un cercle ou un polygone

(dans le cas d'un secteur circulaire représentant la portée d'un feu). Nous respectons ainsi le principe du modèle GeoSPARQL dans lequel les *Features* sont assimilés à des formes géométriques. D'autres éléments sont ajoutés au modèle afin de le compléter. Chaque *NavigationMark* est associé au concept *VHorizon* par la relation *hasHorizonVisibility* et au concept *VWeather* par la relation *hasWeatherVisibility*. Le concept *Vlight* est lié par la relation *hasLightVisibility* au concept *Light*. Ce dernier décrit la notion de feu dans l'ontologie et est aussi une sous-classe de *Feature*. Certains amers peuvent être reliés au concept *light* par la relation *hasLight*. D'autre part, en vue de déterminer la distance horizon, la distance de la portée du feu ainsi que celle de la visibilité relative aux conditions météorologiques, nous associons une propriété de type de données *distance* aux concepts *VHorizon*, *VLight* et *VWeather*. Nous attribuons aussi le paramètre de hauteur aux concepts *NavigationMark* et *Light* par la propriété de données *hasHeight*. Cette hauteur est employée comme paramètre dans le calcul et l'inférence de la zone de visibilité relative à l'horizon.

Spécifier qu'un repère est visible dans un environnement naturel, revient tout d'abord à instancier les concepts *VHorizon*, *VWeather* et *VLight* et ceci via des inférences. Le modèle adopte le principe de la ligne de mire (associé au concept *VisibilityLine*) afin de vérifier qu'il n'y pas d'obstacle naturel entre l'élément à percevoir et le point de référence (c.-à-d. le concept *OriginPoint*). Ainsi, le concept *VisibilityLine* est peuplé à son tour par une ligne formée entre chaque *OriginPoint* et un *NavigationMark*. Au moment où un individu de type *VisibilityLine* est créé, il doit être complété par l'information qui assigne la valeur de la visibilité. Ceci nous mène à définir un état (vrai ou faux) – un amer est visible ou non – pour chaque instanciation de type *VisibilityLine*. Dans ce cas, nous affectons à ce dernier concept, la propriété de type de données *VisibilityStm* (type *Booléen*). Théoriquement, l'expressivité du langage OWL qui intervient dans la description de notre modèle ontologique ne permet d'inférer ni de nouvelles informations comme les données numériques et booléennes, ni de nouveaux faits comme la déduction d'une relation entre des individus, alors que ceci est nécessaire pour l'inférence des routes de navigation. Plus précisément, d'une part les coordonnées géographiques des géométries (cercles ou polygones) relatives aux zones de visibilité doivent être inférées. Ces coordonnées sont décrites au format WKT et accessibles dans le domaine par la propriété de type de données *asWKT*. D'autre part, si un objet est visible à partir d'un point d'observation, ce fait doit être inféré entre l'individu de type *OriginPoint* et l'individu de type *NavigationMark*. Ainsi, une ligne de visibilité est créée entre ces deux points dont l'état est inféré à la valeur vraie. Pour combler les lacunes de raisonnement du langage OWL, nous faisons appel à la technologie SWRL qui permet de faire des inférences par des règles. Cette technologie nous permet de compléter notre modélisation avec une nouvelle expressivité sémantique apte à traiter et vérifier le principe de visibilité des amers.

4.2. Raisonnement fondé sur des règles SWRL

Les inférences avec le langage SWRL suivent un processus de raisonnement déductif. Ceci signifie que la vérité des prémisses assure totalement la vérité de la

conclusion, ou qu'à partir d'un fait résultant d'une autre règle on arrive à la vérité de la conclusion de la règle courante. Les règles SWRL que nous établissons sont construites à partir des différents concepts et des relations de l'ontologie existante avec pour objectif final d'inférer si un amer est visible ou non à partir d'un point d'observation (Règle 4). Afin d'arriver à un tel résultat, différentes règles et *built-ins* contribuent à calculer les coordonnées géographiques de chaque zone et à les inférer comme étant de format WKT.

Règle 1 : Visibilité du repère à l'horizon

$$\begin{aligned} & NavigationMark(?n) \wedge hasGeometry(?n, ?p) \wedge asWKT(?p, ?k) \\ & \wedge hasHeight(?n, ?h) \wedge hasHorizonVisibility(?n, ?l) \wedge hasGeometry(?l, ?c) \\ & \wedge HorizonArea(?w, ?h, ?k) \Rightarrow asWKT(?c, ?w) \end{aligned}$$

Dans la Règle 1, le corps de la règle est constitué du concept *NavigationMark(?n)* avec sa géométrie « ?p » définie par la relation *hasGeometry(?n, ?p)*. La variable « ?p » a des coordonnées géographiques « ?k » au format WKT décrites par la propriété de données *asWKT(?p, ?k)*. L'amer « ?n » est associé au prédicat *hasHorizonVisibility(?n, ?l)* où « ?l » est la zone de visibilité. La valeur « ?l » a une géométrie identifiée par la variable « ?c » dans la relation *hasGeometry(?l, ?c)*. Afin de compléter la définition et inférer les coordonnées géographiques « ?w » au format WKT (liées à la géométrie « ?c » de la zone de visibilité à l'horizon « ?l » pour l'amer « ?n »), nous ajoutons un *built-in* *HorizonArea(?w, ?h, ?k)* où « ?h » est la hauteur du repère « ?n ». Techniquement, cette fonction *built-in*, codée en Java, retourne la géométrie d'un cercle « ?w » au format WKT pour laquelle le centre de ce cercle est la position « ?k » de l'amer et pour laquelle le rayon de ce cercle est calculé à partir du rayon terrestre « *R* » et de la hauteur « ?h » de l'amer, par la formule $Rayon = \sqrt{(2 \times R \times h)}$. Cette règle infère donc les coordonnées géographiques « ?w » au format WKT de la zone de visibilité horizon ayant pour géométrie « ?c » via la propriété de type de données *asWKT*. Cette règle est appliquée sur chaque repère constituant l'environnement.

Règle 2 : Visibilité du bateau à l'horizon

$$\begin{aligned} & OriginPoint(?o) \wedge hasGeometry(?o, ?p) \wedge asWKT(?p, ?k) \\ & \wedge hasHeight(?o, ?h) \wedge hasHorizonVisibility(?o, ?l) \wedge hasGeometry(?l, ?c) \\ & \wedge HorizonArea(?w, ?h, ?k) \Rightarrow asWKT(?c, ?w) \end{aligned}$$

Afin de définir une intervisibilité positive entre un bateau et un amer, la zone de visibilité à l'horizon du bateau doit topologiquement intersecter la zone de visibilité à l'horizon du repère. Ainsi, cette Règle 2 est conçue pour définir les coordonnées géographiques au format WKT de la zone de visibilité à l'horizon pour un bateau. Cette règle est fondée sur le même principe que celui de la Règle 1 en remplaçant l'amer *NavigationMark(?n)* par la position du bateau *OriginPoint(?o)* ayant une hauteur « ?h ».

Règle 3 : Visibilité du repère en fonction des conditions météorologiques

$NavigationMark(?n) \wedge hasGeometry(?n, ?p) \wedge asWKT(?p, ?k)$
 $\wedge hasWeatherVisibility(?n, ?l) \wedge hasGeometry(?l, ?c) \wedge distance(?l, ?d)$
 $\wedge WeatherVisibilityDistance(?w, ?d, ?k) \Rightarrow asWKT(?c, ?w)$

Les conditions météorologiques sont caractérisées par leur changement dynamique. Ainsi, il existe des prévisions sur la visibilité en mer qui fournissent les informations sur la distance de visibilité à laquelle un objet peut être clairement perçu. Dans cette mesure, la Règle 3 aboutit à l'inférence des coordonnées géographiques « ?w » en format WKT pour le cercle de géométrie « ?c ». Ce dernier désigne la géométrie de la zone de visibilité « ?l » relative aux conditions météorologiques et associée au repère « ?n ». Tout comme pour la définition de la Règle 1, nous ajoutons dans la Règle 3 un *built-in* identifié par *WeatherVisibilityDistance(?w, ?d, ?k)* où l'argument « ?d » précise la distance de visibilité fournie par le biais de la propriété de type de données *distance(?l, ?d)*. La règle associe en conséquence la valeur du format WKT « ?w » au cercle de géométrie « ?c » dont le centre est défini par la position du repère « ?n ». Cette règle est également appliquée pour chaque amer constituant l'environnement.

Règle 4 : Intervisibilité entre un bateau (point d'observation) et un amer

$NavigationMark(?n) \wedge hasGeometry(?n, ?p) \wedge asWKT(?p, ?r)$
 $\wedge hasHeight(?n, ?h1) \wedge hasHorizonVisibility(?n, ?l) \wedge hasGeometry(?l, ?b)$
 $\wedge asWKT(?b, ?c) \wedge hasWeatherVisibility(?n, ?w) \wedge hasGeometry(?w, ?a)$
 $\wedge asWKT(?a, ?f) \wedge OriginPoint(?o) \wedge hasGeometry(?o, ?g) \wedge asWKT(?g, ?u)$
 $\wedge hasHeight(?o, ?h2) \wedge hasHorizonVisibility(?o, ?t) \wedge hasGeometry(?t, ?y)$
 $\wedge asWKT(?y, ?x) \wedge VisibilityLine(?s) \wedge hasGeometry(?s, ?k)$
 $\wedge sfContains(?k, ?g) \wedge sfContains(?k, ?p)$
 $\wedge IsVisibleLine(?i, ?r, ?c, ?f, ?u, ?x) \Rightarrow VisibilityStm(?s, ?i)$

La Règle 4 stipule qu'une fois que les trois zones de visibilité sont inférées (zones de visibilité relatives à l'horizon pour le bateau et pour le repère et zone de visibilité liée aux conditions météorologiques), nous pouvons vérifier si l'amer est visible à partir du bateau par le biais du principe d'intervisibilité. Plus précisément, le *built-in IsVisibleLine(?i, ?r, ?c, ?f, ?u, ?x)* est à vrai si le repère « ?n » – de hauteur « ?h1 » – ayant les coordonnées géographiques « ?r », avec une zone de visibilité à l'horizon « ?c » et une zone de visibilité définie par les conditions météorologiques « ?f », est visible à partir du bateau – de hauteur « ?h2 » – ayant une position géographique « ?u » et une zone de visibilité à l'horizon « ?x ». Les sous-conditions *sfContains(?k, ?g)* et *sfContains(?k, ?p)* sont intégrées afin de vérifier que la ligne de visibilité « ?s » – ayant pour géométrie « ?k » – passe par la position du bateau – ayant pour géométrie « ?g » – et la position de l'amer en question – ayant pour géométrie « ?p ». En conséquence, cette règle assigne, via la propriété de type de données *VisibilityStm(?s, ?i)*, un état de visibilité à l'individu « ?s » de type *VisibilityLine*. Cet état est de valeur booléenne qui est à vrai si le repère est visible à partir du bateau et à faux dans le cas contraire. La valeur booléenne est stockée dans le paramètre « ?i ». Le *built-in IsVisibleLine(?i, ?r, ?c, ?f, ?u, ?x)* retourne la valeur « true » si les conditions ci-dessous sont satisfaites dans l'ordre :

- Les deux zones de visibilité à l'horizon « ?x » et « ?c » pour le bateau et pour l'amer doivent être en intersection topologique ;
- La localisation du bateau « ?u » doit être topologiquement dans la zone de visibilité définie par les conditions météorologiques « ?f » ;
- En considérant la ligne de visibilité, aucun obstacle présent sur la ligne n'a une élévation qui excède l'élévation de la ligne de mire.

5. Discussions et perspectives

Les systèmes de positionnement (GPS, AIS) sont omniprésents dans de nombreux secteurs. Dans le domaine maritime, les systèmes de positionnement par GPS et AIS (« Automatic Identification System ») servent à un suivi de route mais aussi à une exploitation de données ayant trait à divers phénomènes (pollution, migration d'animaux marins, etc.). Dans leur analyse, les opérateurs ayant en charge la surveillance du trafic maritime se doivent de fédérer et traiter les informations provenant des moyens de détections terrestres (radars, systèmes électro-optiques, etc.) et des moyens embarqués (AIS, etc.). En complément des systèmes de surveillance à vocation professionnelle, les données d'empreintes de navires peuvent aussi être accessibles pour des utilisateurs lambda par des serveurs cartographiques⁹. Si les systèmes actuels intègrent couramment des systèmes d'alarme fondés par exemple sur la réglementation maritime comme le sens de circulation dans les dispositifs de séparation de trafic (DST) ou sur la présence d'un navire dans une zone de faible profondeur en dessous d'une isobathe de sécurité fixée, les opérateurs doivent aussi déterminer si l'empreinte d'un navire a du sens ou non. En effet, un non-sens pourrait révéler un phénomène inattendu et une situation d'insécurité (p. ex. avarie de barre, trafic de marchandises non autorisées, etc.). Un des enjeux actuels des systèmes de navigation est d'intégrer de la sémantique au sein des systèmes afin de faciliter l'interprétation des empreintes de navires. Cette recherche a pour objectif applicatif final d'apporter un premier niveau d'analyse sémantique de trajectoires de navigation maritime côtière en lien avec une modélisation des connaissances du domaine. Ainsi, deux approches peuvent être envisagées.

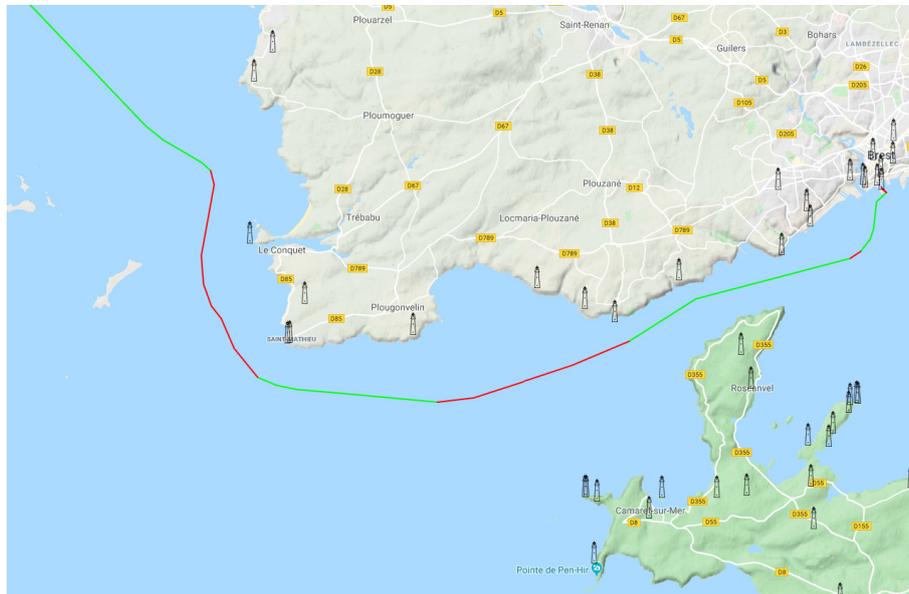
Une fois le modèle de connaissances ainsi défini, ce dernier peut être peuplé par des données réelles contenues dans les ENC (*Electronic Navigational Chart*) au format S-57 ou dans des descriptions textuelles telles que celles des « Instructions nautiques » du SHOM (cf. section 2.1). Une première stratégie d'analyse sémantique consiste à confronter les routes inférées à partir de l'ontologie instanciée, routes dites « théoriques », aux routes dites « réelles » des bateaux obtenues par filtrage et simplification de leurs données de positionnement. Dans le cadre de notre étude, les routes réelles sont obtenues à partir d'empreintes AIS de navires.

Plus précisément sur le mécanisme d'inférence, la modélisation présentée dans cet article est fondée sur deux raisonnements. Le premier est axiomatique résultant des

9. par exemple, le serveur cartographique <https://www.marinetraffic.com>.

définitions des axiomes (cf. tableau 1), le second est fondé sur des règles SWRL. Pour maintenir la décidabilité et la consistance de notre ontologie les deux mécanismes de raisonnement sont séparés et ne sont pas exécutés en parallèle. Ainsi, l'ontologie principale est séparée en deux ontologies. D'une part, nous avons une base de connaissances avec toutes les définitions axiomatiques complexes des concepts mais sans les règles SWRL et d'autre part, nous avons une ontologie comprenant les règles SWRL et tous les concepts de l'ontologie mais sans les définitions axiomatiques complexes. Une fois les ontologies définies, un algorithme de subdivision de l'espace génère des points de vue (*OriginPoint*) fictifs, ce qui permet d'exploiter l'ontologie avec les règles SWRL (sans les axiomes) afin de générer les points de décision et lignes d'intervisibilité à partir de ces points de vue. Ce premier raisonnement représente donc un processus de peuplement de l'autre ontologie, qui est enrichie avec les axiomes (sans les règles SWRL), afin d'en déduire les segments portant sur un relèvement ou un alignement. En effet, l'assertion de ces lignes d'intervisibilité et des points de décision contribue à l'inférence des connaissances définies par les axiomes complexes et, de ce fait, générées par le biais du processus de raisonnement axiomatique. Plus précisément, ce dernier peuplera l'ontologie avec des *WayPoints* et ainsi avec des segments décrivant les routes théoriques qui suivent un ou plusieurs *landmark*. Le mécanisme de raisonnement décrit ici est élaboré dans un mode ouvert (*Open World Assumption*). Ceci signifie que si une information n'est pas connue cela n'affirme pas que cette information soit fausse. Cette supposition nous a incités à ajouter des définitions restrictives sur les instances en attribuant à chaque définition une exclusivité. Par exemple, si une ligne est définie par deux points elle ne le sera que par ces deux points. Ou encore, si deux lignes ont une intersection il ne peut y avoir qu'une seule intersection définie par un seul point.

La figure 8 illustre l'analyse d'une empreinte de navigation maritime côtière dans laquelle les sections de couleur verte indiquent les portions ayant une sémantique connue pour notre modèle, c'est-à-dire les portions à proximité (à une distance paramètre du traitement) d'une route théorique fondée sur un alignement ou un relèvement sur un amer. À l'inverse, les portions dénuées de sens sont indiquées en rouge. Ces portions en rouge n'indiquent pas forcément une situation d'insécurité mais soulignent que ce comportement n'est pas pris en compte dans le modèle de connaissances qui est défini et qu'une attention plus particulière doit être apportée. La figure 8 est complétée (en bas) par la description de la sémantique des routes présentes dans la trajectoire. Afin d'approfondir l'analyse, un projet complémentaire a été initié pour prendre en compte la sémantique des objets de type « Bouée » dans l'analyse des empreintes (Fournier, Tyschenko, 2019). Cependant, et en lien avec les propos introductifs, cette approche symbolique permet de faire émerger les situations qui sont modélisées dans le modèle de connaissances et d'en fournir une sémantique. En revanche, elle est incapable d'expliquer les situations inattendues. C'est la raison pour laquelle les approches numériques fondées sur l'analyse des données sont complémentaires à la nôtre et peuvent renforcer l'analyse sémantique des traces de navigation maritime côtière (Camossi *et al.*, 2013 ; Vandecasteele *et al.*, 2014).



- route n°1 : au 122° aucun amer
- route n°2 : au 121° aucun amer
- route n°3 : au 237° sur l'alignement entre Pointe du Toulinguet et Amer sans nom par l'avant
- route n°4 : au 188° sur l'alignement entre Amer sans nom et Amer sans nom par l'avant
- route n°5 : au 206° sur Amer sans nom par l'arrière
- route n°6 : au 229° sur Amer sans nom par l'avant
- route n°7 : au 247° aucun amer
- route n°8 : au 259° sur Le Petit Minou par l'avant

Figure 8. Analyse sémantique d'une trajectoire de navigation maritime côtière. En vert, les routes ayant une sémantique pour le modèle de connaissances et en rouge, celles dénuées de sémantique. En bas, et pour une trajectoire orientée de droite à gauche, la sémantique associée à chaque route

Une autre approche d'analyse sémantique consiste à instancier tout d'abord le concept *Route* de l'ontologie par des routes réelles et d'inférer ensuite les éléments (repères, alignements, relèvements) contribuant potentiellement à définir la sémantique des routes réelles. Cette approche différente nécessite de compléter la formalisation axiomatique ou à base de règles de l'ontologie existante afin d'en déduire les éléments à associer aux routes de navigation. Elle fait donc l'objet de recherches ultérieures permettant de compléter la présente recherche. Notons cependant que cette dernière approche est moins adaptée aux analyses sémantiques « temps quasi réel », puisque dans la première approche les routes théoriques peuvent être précalculées et être ainsi directement comparées aux données réelles, réduisant alors les temps de traitement majoritairement imputables au processus d'inférence.

Bibliographie

- Baader F., Calvanese D., McGuinness D. L., Nardi D., Patel-Schneider P. F. (2010). *The description logic handbook: Theory, implementation and applications* (2nd éd.). USA, Cambridge University Press.
- Camossi E., Villa P., Mazzola L. (2013). Semantic-based anomalous pattern discovery in moving object trajectories. *Computing Research Repository (CoRR)*.
- Egenhofer M., Herring J. (1990). *Categorizing binary topological relationships between regions, lines, and points in geographic databases*. Rapport technique. Department of Surveying Engineering, University of Maine.
- Fournier T., Tyschenko R. (2019). *Analyse de trajectoire de navigation maritime fondée sur la sémantique*. (Rapport de projet informatique 2e année, Ecole navale)
- Horridge M., Drummond N., Goodwin J., Rector A., Stevens R., Wang H. (2006). The manchester OWL syntax. In *Proceedings of the 2006 OWL experiences and directions workshop (OWL-ED2006)*.
- Kowalski J.-M. (2009). *Thalassographeïn : mesure, représentation et description des espaces maritimes en grèce ancienne*. Thèse de doctorat non publiée, Université de Nice, France.
- Laddada W. (2018). *Vers une émergence des systèmes d'information géographique maritime fondés sur la connaissance : application aux systèmes d'aide à la navigation*. Thèse de doctorat non publiée, Université de Bretagne Occidentale, France.
- Lamotte L., Abadie N., Saux E., Kergosien E. (2019). Extraction de connaissances pour la description de l'environnement maritime côtier à partir de textes d'aide à la navigation. In *Proceedings de la conférence extraction et gestion des connaissances (EGC), Bruxelles*, p. 341-348.
- Marine nationale. (2005). *Directives générales pour la conduite nautique, force d'action navale, édition 2005*. Marine-nationale.
- Maurel D., Friburger N., Antoine J.-Y., Eshkol I., Nouvel D. (2011). Cascades de transducteurs autour de la reconnaissance des entités nommées. *Traitement Automatique des Langues*, vol. 52, n° 1, p. 69-96.
- Moncla L. (2015). *Automatic reconstruction of itineraries from descriptive texts*. Thèse de doctorat non publiée, Université de Pau, France.
- Przytula-Machrouh E. (2004). *Information verbale et information graphique pour la description d'itinéraires : une approche pluridisciplinaire*. Thèse de doctorat non publiée, Université René Descartes, Boulogne-Billancourt, France.
- Randell D. A., Cui Z., Cohn A. G. (1992). A spatial logic based on regions and connection. In *Kr'92: Proceedings of the third international conference on principles of knowledge representation and reasoning*, p. 165–176.
- SHOM. (2018). *Instructions nautiques, France (côtes nord et ouest), du cap de la hague à la pointe de penmarc'h (version à jour au 19 décembre 2018)*. SHOM.
- Tsatcha D., Saux E., Claramunt C. (2012). A modeling approach for the extraction of semantic information from a maritime corpus. In S. Timpf, P. Laube (Eds.), *Proceedings of the 15th international symposium on advances in spatial data handling (SDH)*, p. 175–191. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Vandecasteele A., Devillers R., Napoli A. (2014). From movement data to objects behavior using semantic trajectory and semantic events. *Marine Geodesy: Special Issue on Coastal and Marine Geographic Information Systems*, vol. 37, n° 2, May, p. 126-144.

Voiles et voiliers. (2006). *Pilote côtier. De Saint-Malo à Brest. 9e édition.*

