



# Vers une émergence des systèmes d'information géographique maritime fondés sur la connaissance : application aux systèmes d'aide à la navigation

Wissame Laddada

## ► To cite this version:

Wissame Laddada. Vers une émergence des systèmes d'information géographique maritime fondés sur la connaissance : application aux systèmes d'aide à la navigation. Autre. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2018. Français. NNT : 2018BRES0082 . tel-03901025v2

**HAL Id: tel-03901025**

**<https://theses.hal.science/tel-03901025v2>**

Submitted on 15 Dec 2022

**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.

# THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE  
DE BRETAGNE OCCIDENTALE  
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 598  
*Sciences de la Mer et du littoral*  
Spécialité : « Géomatique »

Par

**« Wissame LADDADA »**

**« Vers une émergence des systèmes d'information géographique maritime fondés sur la connaissance : application aux systèmes d'aide à la navigation »**

Thèse présentée et soutenue à l'École navale, le 4 Décembre 2018  
Unité de recherche : IRENav

## Rapporteurs avant soutenance :

|                     |                                                                     |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Isabelle MOUGENOT   | Maître de conférences HDR<br>Université Montpellier                 |
| Chantal SOULÉ-DUPUY | Professeur des Universités<br>Université Toulouse III Paul Sabatier |

## Composition du Jury :

|                      |                                                                     |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Rapporteurs :        |                                                                     |
| Isabelle MOUGENOT    | Maître de conférences HDR<br>Université Montpellier                 |
| Chantal SOULÉ-DUPUY  | Professeur des Universités<br>Université Toulouse III Paul Sabatier |
| Examineurs :         |                                                                     |
| Jean-Philippe BABAU  | Professeur des Universités<br>Université de Bretagne Occidentale    |
| Président :          |                                                                     |
| Christophe CLARAMUNT | Professeur des Universités<br>Ecole navale                          |
| Aldo NAPOLI          | Chargé de recherche HDR<br>MINES ParisTech                          |
| Directeur de thèse : |                                                                     |
| Éric SAUX            | Maître de conférences HDR<br>Ecole navale                           |

A mes grands-parents et parents...



# Remerciements

La thèse en soit est comme une trajectoire. En partant d'un point, nous collectons toutes les informations qui influencent les travaux, nous les analysons pour prendre en compte ce qui nous intéresse et nous fait avancer jusqu'au point d'arrivée qui représente l'aboutissement de notre travail. Tout au long de l'avancée, un certain dynamisme de nature scientifique ou humain brouille notre champ de vision vis-à-vis de l'objectif à accomplir. Toutefois, il faut garder les repères en vue et poursuivre les travaux afin de mener la thèse jusqu'au bout sans se perdre. Je dis donc un grand MERCI à tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin à voir plus clair grâce à leur professionnalisme ou leur soutien.

Je tiens tout d'abord à remercier vivement et chaleureusement mon encadrant et directeur de thèse, Monsieur Eric SAUX, d'avoir été très attentif et patient lors des innombrables heures de discussion relatives à mon travail. J'aimerais aussi lui dire à quel point sa rigueur scientifique et ses conseils m'ont été d'une grande aide et que ses relectures très méticuleuses ont donné plus de sens à mes allégations. En plus de ses qualités professionnelles et sa disponibilité, j'ai vraiment apprécié son écoute, sa compréhension et son soutien moral tout au long de mes travaux de recherche car une thèse c'est aussi une aventure humaine. Donc un GRAND merci.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer mon travail. Je remercie donc vivement Madame Isabelle MOUGENOT, en qualité de rapporteur, pour ses précieux conseils, remarques et suggestions. Ses compétences et ses connaissances dans le domaine du web sémantique m'ont énormément aidé à voir plus clair et à présenter mes travaux. Aussi, je remercie sincèrement Madame Chantal SOULÉ-DUPUY, en qualité de rapporteur, pour avoir consacré du temps pour la lecture du manuscrit ainsi que pour les remarques et suggestions pertinentes qu'elle m'a indiquées. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Monsieur Jean-Philippe

BABAU et Monsieur Aldo NAPOLI qui ont témoigné de l'intérêt pour mes travaux, en qualité d'examineurs, par leur lecture, écoute et présence à la soutenance. J'adresse un grand merci à Monsieur Christophe CLARAMUNT, en qualité d'examineur et président de jury pour ses nombreux commentaires constructifs et ceux tout au long qu'aura duré ma thèse. Je lui suis très reconnaissante pour son encouragement, en qualité de directeur de l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale, l'IRENav, où j'ai effectué mes travaux, et pour son influence scientifique qui témoigne de sa prestigieuse expérience en matière d'encadrement. Son enthousiasme et sa rigueur ainsi que ses qualités sur un plan humain véhiculent une ambiance très favorable dans le laboratoire pour mener les travaux dans les meilleures conditions.

Ma gratitude va également sans faille à tout le personnel de l'école navale qui travaille dans l'optique de fournir les conditions nécessaires et favorables pour finaliser les différents projets. Leur bonne humeur matinale, « en dépit du climat brestois », véhicule une ambiance idéale pour l'accomplissement du travail que ce soit en matière d'enseignement ou de recherche.

Je souhaite remercier tous mes collègues doctorants ou post-doctorants, avec qui j'ai partagé de bons moments et qui se reconnaîtront, pour leur humeur, humour et leur encouragement. Une reconnaissance spéciale pour mon ami Dieudonné TSATCHA dont les précieux conseils en matière scientifique et technique m'ont beaucoup aidé. Je le remercie surtout sur un plan humain pour son sourire, son encouragement et son soutien moral tout au long de ma thèse.

Sur un plan plus personnel, je remercie tous mes amis notamment ma meilleure amie Lila mais aussi et surtout toute ma famille pour le soutien indéfectible qu'on m'a apporté. Je ne remercierai jamais assez mon oncle Messaoud LADDADA pour ses nombreux conseils et remarques pertinentes ainsi que pour son partage d'expérience et sa bonne humeur durant les vacances. Ceci m'a beaucoup aidé pour avancer et ne pas flancher durant ma thèse. Mes remerciements chaleureux vont aussi à mes chères sœurs : Souhila, Soraya, Nadjet et Yasmine. Je remercie aussi mon très cher frère Fodhil (affectueusement Dodil) dont la bonne humeur contagieuse m'a fait garder le sourire durant des moments délicats. Sans oublier bien évidemment, je serais éternellement reconnaissante à mes grands-parents maternels qui avaient toujours été là pour moi depuis ma tendre enfance. Enfin, je ne remercierais sans aucun doute jamais assez mes parents, à qui je dédie ma thèse, pour leur amour et leur soutien inconditionnels et sans qui je ne serais pas devenue la personne que je suis aujourd'hui.

# Table des matières

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Remerciements</b>                                                 | <b>iii</b> |
| <b>Introduction générale</b>                                         | <b>1</b>   |
| Contexte global . . . . .                                            | 1          |
| Problématique . . . . .                                              | 3          |
| Objectifs et verrous scientifiques . . . . .                         | 4          |
| Structure du manuscrit . . . . .                                     | 6          |
| <b>1 Littérature</b>                                                 | <b>9</b>   |
| 1.1 Introduction . . . . .                                           | 9          |
| 1.2 Pathfinding vs. Wayfinding . . . . .                             | 10         |
| 1.3 Facteurs de wayfinding . . . . .                                 | 12         |
| 1.3.1 Structuration physique de l'environnement . . . . .            | 12         |
| 1.3.2 Repères et réglementations . . . . .                           | 13         |
| 1.3.3 Dimension temporelle . . . . .                                 | 14         |
| 1.3.4 Influence de la saillance et de l'affordance . . . . .         | 15         |
| 1.4 Aspects théoriques . . . . .                                     | 18         |
| 1.4.1 Formalismes spatiaux . . . . .                                 | 18         |
| 1.4.2 Raisonnement . . . . .                                         | 25         |
| 1.4.3 Formalisme temporel . . . . .                                  | 28         |
| 1.4.4 Importance de la cognition . . . . .                           | 30         |
| 1.5 La sémantique dans la modélisation de trajectoire . . . . .      | 32         |
| 1.5.1 De la trajectoire à la sémantique . . . . .                    | 32         |
| 1.5.2 De la sémantique à la trajectoire . . . . .                    | 33         |
| 1.5.3 Modèles qualitatifs pour la description d'itinéraire . . . . . | 36         |
| 1.6 Conclusion . . . . .                                             | 38         |
| <b>2 Modélisation ontologique</b>                                    | <b>41</b>  |
| 2.1 Introduction . . . . .                                           | 41         |
| 2.2 Ontologie . . . . .                                              | 42         |
| 2.2.1 De la philosophie à l'intelligence artificielle . . . . .      | 42         |

|          |                                                                                     |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.2    | Les composants dans une ontologie . . . . .                                         | 44        |
| 2.2.3    | Les types d'ontologies . . . . .                                                    | 45        |
| 2.3      | De la description à la conceptualisation . . . . .                                  | 45        |
| 2.4      | De la conceptualisation à la formalisation . . . . .                                | 48        |
| 2.4.1    | Préliminaires et motivation . . . . .                                               | 48        |
| 2.4.2    | Vers la formalisation des concepts . . . . .                                        | 50        |
| 2.5      | Modélisation ontologique de la trajectoire . . . . .                                | 58        |
| 2.5.1    | Les technologies du web sémantique . . . . .                                        | 58        |
| 2.5.2    | Vers une ontologie de la navigation maritime côtière . . . . .                      | 59        |
| 2.6      | cas d'utilisation . . . . .                                                         | 65        |
| 2.6.1    | Peuplement de l'ontologie . . . . .                                                 | 66        |
| 2.6.2    | Résultats du raisonnement . . . . .                                                 | 68        |
| 2.7      | Conclusion . . . . .                                                                | 69        |
| <b>3</b> | <b>Les zones de visibilité et leur inférence dans le modèle</b>                     | <b>73</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .                                                              | 73        |
| 3.2      | Visibilité des repères dans la planification des routes . . . . .                   | 74        |
| 3.2.1    | Notions de visibilité des repères en navigation maritime<br>côtière . . . . .       | 76        |
| 3.2.2    | Analyse graphique de la notion de visibilité . . . . .                              | 77        |
| 3.3      | Enrichissement de l'ontologie par les éléments des zones de<br>visibilité . . . . . | 80        |
| 3.3.1    | Définition de la hiérarchie des concepts de visibilité . . . . .                    | 80        |
| 3.3.2    | Règles SWRL et inférences des zones de visibilité . . . . .                         | 82        |
| 3.4      | Cas d'étude . . . . .                                                               | 87        |
| 3.4.1    | Architecture modulaire avec le système d'inférence . . . . .                        | 87        |
| 3.4.2    | Résultat du raisonnement . . . . .                                                  | 89        |
| 3.5      | Conclusion . . . . .                                                                | 94        |
| <b>4</b> | <b>Algorithmes pour la génération des points de décision</b>                        | <b>97</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .                                                              | 97        |
| 4.2      | Définition de la problématique . . . . .                                            | 98        |
| 4.3      | Graphe de visibilité . . . . .                                                      | 99        |
| 4.4      | Terminologies et définitions . . . . .                                              | 100       |
| 4.5      | Graphe de visibilité dans le contexte maritime côtier . . . . .                     | 101       |
| 4.5.1    | Propriétés du graphe de visibilité . . . . .                                        | 101       |
| 4.5.2    | Formalisation des propriétés . . . . .                                              | 103       |
| 4.6      | Enrichissement de l'ontologie . . . . .                                             | 104       |
| 4.6.1    | Dimension spatiale environnementale . . . . .                                       | 104       |
| 4.6.2    | Enrichissement de OriginPoint . . . . .                                             | 105       |
| 4.7      | Génération des OriginPoints fictifs . . . . .                                       | 106       |

|                                                       |                                                                                                      |            |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.7.1                                                 | Principe du partitionnement binaire de l'espace . . . . .                                            | 107        |
| 4.7.2                                                 | Partitionnement binaire de l'espace pour la génération<br>des OriginPoints fictifs . . . . .         | 108        |
| 4.8                                                   | Approche globale pour la génération du graphe principal et le<br>sous-graphe de visibilité . . . . . | 110        |
| 4.9                                                   | Exploitation de la base de connaissances . . . . .                                                   | 113        |
| 4.10                                                  | Cas d'étude . . . . .                                                                                | 114        |
| 4.11                                                  | Conclusion . . . . .                                                                                 | 115        |
| <b>Conclusion et perspectives</b>                     |                                                                                                      | <b>119</b> |
|                                                       | Bilan sur les contributions . . . . .                                                                | 119        |
|                                                       | Perspectives . . . . .                                                                               | 122        |
| <b>A La base de connaissances</b>                     |                                                                                                      | <b>125</b> |
| <b>B Exemples d'instructions nautiques textuelles</b> |                                                                                                      | <b>127</b> |



# Table des figures

|      |                                                                                              |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1    | Exemple d'une suggestion de routes enrichies avec des connaissances Rondeau (2007) . . . . . | 3  |
| 2    | Thématiques scientifiques et domaines applicatifs abordés lors de la thèse . . . . .         | 5  |
| 3    | Vue globale des contributions présentées dans les chapitres . . .                            | 6  |
| 1.1  | Étapes globales de processus wayfinding . . . . .                                            | 15 |
| 1.2  | tax . . . . .                                                                                | 20 |
| 1.3  | Catégories de relations d'orientation . . . . .                                              | 24 |
| 1.4  | Modèles à base de cônes . . . . .                                                            | 25 |
| 1.5  | Modèles à base de projection . . . . .                                                       | 25 |
| 1.6  | Liens cognitifs des facteurs impliqués dans le processus de wayfinding . . . . .             | 30 |
| 1.7  | De la trajectoire brute à la trajectoire sémantique . . . . .                                | 34 |
| 2.1  | Les étapes d'une modélisation ontologique . . . . .                                          | 44 |
| 2.2  | Illustration d'une trajectoire de navigation maritime . . . . .                              | 46 |
| 2.3  | Graphique illustrant le concept de trajectoire . . . . .                                     | 52 |
| 2.4  | Graphiques illustrant les concepts d'alignement (a) et de relèvement (b). . . . .            | 53 |
| 2.5  | Notions géométriques associées à la visualisation d'un amer . . .                            | 54 |
| 2.6  | Illustration de la pile du web sémantique . . . . .                                          | 59 |
| 2.7  | Modélisation ontologique du standard GeoSPARQL . . . . .                                     | 60 |
| 2.8  | Extrait d'une représentation d'une entité spatiale . . . . .                                 | 62 |
| 2.9  | Modélisation ontologique de la trajectoire en navigation côtière                             | 63 |
| 2.10 | Illustration des instanciations et des résultats du raisonnement                             | 68 |
| 3.1  | Relèvement autant que ligne de mire . . . . .                                                | 77 |
| 3.2  | Modélisation de la visibilité fondée sur la ligne de mire . . . . .                          | 77 |
| 3.3  | Visibilité de l'objet selon le critère de la distance à l'horizon . .                        | 79 |
| 3.4  | Influences des conditions météorologiques et des feux sur la visibilité . . . . .            | 80 |

|     |                                                                                                                                            |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5 | Extension de l'ontologie avec la notion de visibilité relative<br>aux repères . . . . .                                                    | 82  |
| 3.6 | Vue globale de l'architecture applicative . . . . .                                                                                        | 89  |
| 3.7 | Zones de visibilité inférées pour l'amer " <i>Point du petit Minou</i> <sup>1</sup> " . . . . .                                            | 93  |
| 3.8 | Ligne topographique au niveau de la ligne de visibilité (API<br>Elevation de Google Maps) . . . . .                                        | 94  |
| 4.1 | Des lignes de visibilité au graphe de visibilité . . . . .                                                                                 | 99  |
| 4.2 | Graphe de visibilité principal . . . . .                                                                                                   | 103 |
| 4.3 | Sous-graphe de visibilité exploitable pour une trajectoire . . . . .                                                                       | 105 |
| 4.4 | Enrichissement conceptuel pour la génération des points de<br>décision . . . . .                                                           | 106 |
| 4.5 | Principe du partitionnement de l'espace . . . . .                                                                                          | 108 |
| 4.7 | Principe global de l'exploitation des données . . . . .                                                                                    | 114 |
| 4.8 | Espace ouvert (île d'Ouessant) enrichi avec un réseau de cir-<br>culation suivant les repères, en appliquant l'approche proposée . . . . . | 116 |
| A.1 | Statistiques sur l'ensemble des objets définis dans l'ontologie<br>établie par l'outil Protégé . . . . .                                   | 125 |
| A.2 | Exemple de résultats des inférences par règles SWRL après<br>exécution des Algorithmes 1 et 2 . . . . .                                    | 126 |
| A.3 | La hiérarchie des différents concepts définis dans l'ontologie<br>(vue extraite de l'outil Protégé) . . . . .                              | 126 |
| B.1 | Extrait de l'ouvrage Pilote Côtier Rondeau (2007) . . . . .                                                                                | 128 |
| B.2 | Extrait de l'ouvrage Pilote Côtier Rondeau (2007) . . . . .                                                                                | 129 |

# Liste des tableaux

|     |                                                                                                  |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Récapitulatif des relations topologiques . . . . .                                               | 21 |
| 1.2 | les relations topologiques avec la théorie de n-intersection . . .                               | 23 |
| 1.3 | Raisonnement et composition de relations RCC8 Cohn et al.<br>(1997) . . . . .                    | 26 |
| 1.4 | Composition de relations de direction (avec cônes) Frank (1996)                                  | 27 |
| 1.5 | Composition de relations de direction (avec projection) Frank<br>(1996) . . . . .                | 28 |
| 1.6 | Les relations temporelles d'Allen (Allen's interval algebra) . .                                 | 29 |
| 1.7 | Classification de différentes modélisations du processus de<br>« wayfinding ». . . . .           | 37 |
| 2.1 | Concepts atomiques . . . . .                                                                     | 55 |
| 2.2 | Le résultat du raisonnement à travers le modèle dans le cas<br>d'utilisation . . . . .           | 69 |
| 2.3 | Les inférences possibles globales à travers le modèle . . . . .                                  | 70 |
| 3.1 | Satisfaisabilité des conditions de la <i>Règle 1</i> . . . . .                                   | 90 |
| 3.2 | Satisfaisabilité des conditions de la <i>Règle 2</i> . . . . .                                   | 91 |
| 3.3 | Satisfaisabilité des conditions de la <i>Règle 3</i> . . . . .                                   | 91 |
| 3.4 | Satisfaisabilité des conditions de la <i>Règle 4</i> . . . . .                                   | 92 |
| 3.5 | Instanciations vs. inférences via l'ontologie pour le wayfinding<br>en milieu maritime . . . . . | 95 |



# Introduction générale

## Contexte global

L'orientation spatiale est un comportement qu'une personne adopte quotidiennement dans un environnement donné. Cette orientation est guidée par l'intention d'atteindre une destination et mener différentes activités. Dans cette optique, nous recevons des informations environnementales qui influencent nos décisions dans le choix de l'orientation et ainsi du chemin à prendre. Ces informations sont interprétées et décodées par la personne qui évolue dans l'environnement pour aboutir à l'inférence d'une route qui est influencée par la compréhension de ces informations. Ainsi, la diversité des environnements rend la compréhension et l'interprétation des informations qu'ils renvoient plus variables. Ceci engendre la difficulté à prendre une décision quant à notre orientation spatiale pour arriver à destination. Afin d'aider l'être humain à effectuer cette tâche, des systèmes d'aide à la décision intégrés dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont vu le jour. Cependant, la large sémantique et le dynamisme reflétés par l'environnement génèrent une complexité dans la conception de tels systèmes. En effet, chaque environnement est constitué de ses propres éléments qui favorisent ou pas une orientation donnée. C'est pourquoi, l'introduction de l'intelligence artificielle dans les SIG joue un rôle important pour contribuer au mieux à la modélisation d'un environnement et rapprocher davantage l'inférence de ces systèmes à celle de l'être humain.

L'interprétation ou la perception des éléments et des connaissances environnementaux par un système requiert une modélisation proche du monde réel afin de simuler pertinemment le comportement cognitif de l'homme. Des recherches en sciences de l'information géographique ont été menées dans ce sens, afin de comprendre l'interaction de l'homme avec l'environnement dans lequel il évolue. Dans ce cadre, le terme « wayfinding » a pris place dans la définition de l'orientation spatiale, qui englobe la recherche d'un chemin, communément connue sous le terme de navigation. Au regard de cette

dernière, les concepteurs de SIG sont confrontés à de véritables challenges dans la modélisation des environnements. Ceci s'explique par la diversité des facteurs qui les caractérisent, à savoir, leur structure, leur topographie, leur nature ou encore les objets qui s'y trouvent. Ainsi, nous distinguons les milieux « indoors », qui décrivent généralement les bâtisses telles que les hôpitaux ou les aéroports, et les milieux « outdoors » qui représentent notamment les environnements urbains ou naturels.

L'environnement maritime auquel nous portons un intérêt est un milieu « outdoors » semi structuré. A l'instar de l'environnement urbain – qui est fortement structuré en raison des réseaux routiers qui l'organise –, le milieu maritime est un espace ouvert. La problématique de ce dernier figure dans la modélisation et la génération d'un chemin à suivre car il n'est pas contraint par un réseau de communication concret qui peut être modélisé avec des graphes afin de faciliter la conception des systèmes d'aide à la navigation. De ce fait, en vue de modéliser les routes dans cet environnement maritime, un concepteur doit tenir compte des éléments qui le constituent et qui représentent une influence. De plus, ces éléments sont dynamiques et imprévisibles, principalement lors d'une navigation maritime côtière dont les règles d'orientation changent avec la dimension temporelle (jour/nuit) ou avec les conditions météorologiques.

Dans la Figure 1 extraite de [Rondeau \(2007\)](#), nous remarquons que les routes, qui composent une trajectoire maritime côtière, suivent des repères pour mener une navigation sécurisée. La préparation de ces trajectoires est une opération souhaitable pour un navigateur avant de prendre le large. Dans un contexte applicatif, la réalisation de cette tâche s'appuie sur deux aides importantes : la carte de navigation électronique (ENC) et les documents textuels d'aide à la navigation. Hormis le fait qu'une ENC soit une interprétation numérique d'une carte papier, elle représente une riche ressource pour des systèmes d'information qui se transforment en de véritables systèmes d'information géographique, quand ils sont associés aux ENC tel que ECDIS (Electronic Chart Display and Information System). Bien qu'ils offrent un panel de fonctions relatives aux routes, ces systèmes ne proposent pas des planifications de trajectoires fondées sur la sémantique mais rapportent une aide aux usagers pour afficher des données utiles en navigation côtière. Une trajectoire fondée sur la sémantique engloberait le plus de connaissances possible nous pouvons distinguer dans la Figure 1. Par exemple, ces connaissances peuvent représenter les informations relatives à un relèvement sur un repère, représenté par une ligne et un cap avec une valeur en degrés. Les lignes dans cette même Figure sont considérées comme d'éventuelles routes, sans danger,

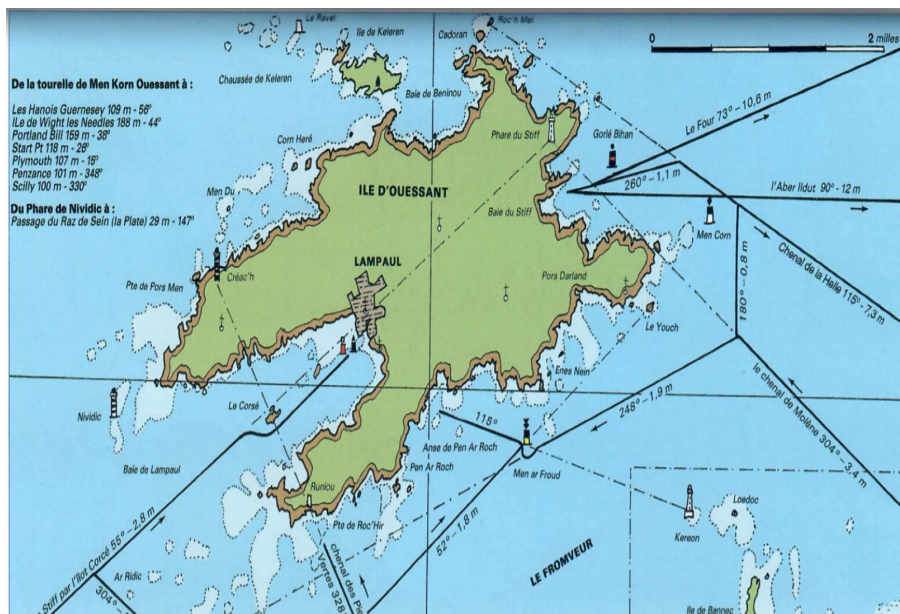


FIGURE 1 – Exemple d’une suggestion de routes enrichies avec des connaissances [Rondeau \(2007\)](#)

à suivre pour atteindre une destination.

## Problématique

La proposition d’une trajectoire par un système automatisé – dans un contexte de wayfinding – exige une modélisation qui capture l’ensemble des objets de l’environnement. En outre, le traitement de cet ensemble nécessite la compréhension sémantique du rôle que peut refléter un objet donné. À titre d’exemple, dans le cadre de la thèse, un repère existant sur la carte maritime peut être suivi s’il est visible à partir d’un point d’où s’effectue le changement de cap. Cette notion de visibilité est reliée au fait que la navigation peut être de jour ou de nuit comme elle peut être dans des conditions météorologiques qui diminuent l’acuité visuelle. Lors d’une navigation de nuit, un usager marin est obligé de prendre en compte les feux pour s’orienter sur une route sécurisée. Cette dernière passe par différentes analyses spatiales, telle que la profondeur, qui est reliée à la dimension temporelle (prise en compte de la marée), ou encore les obstacles topographiques au niveau du parcours. Par conséquent, chaque élément de la trajectoire est défini en fonction de trois facteurs : influence spatiale, temporelle et influence des repères. Ceci implique une modélisation multidimensionnelle. Or les systèmes existants n’exploitent

pas toute cette sémantique. Il est alors nécessaire de proposer un modèle aussi réaliste que possible. Cette considération doit mettre en avant les propriétés et les rôles des éléments de la trajectoire, ainsi que ceux de l'environnement en tenant compte des relations qui les associent.

## Objectifs et verrous scientifiques

L'objectif principal de la thèse est la prise en compte des dimensions spatiale, temporelles et sémantique dans la modélisation des objets pour une mise en application de recherche de « chemin » dans un processus de way-finding en navigation maritime côtière. La complexité de l'environnement maritime côtier doit être intégrée dans la conception du modèle afin de consolider les principes de la navigation et ses dépendances. Comme dans chaque modélisation, des contraintes entrent en jeu et imposent des analyses sur les différentes dimensions. Ces contraintes se manifestent tout d'abord dans la modélisation de la trajectoire dans un espace ouvert non contraint par un réseau de communication. Ensuite, le choix des routes impose l'intégration de l'orientation par le biais des repères dont la sélection est contextuelle. Plus explicitement, le contexte apparaît au niveau du type de navigation qui est influencée par la notion de visibilité. La trajectoire formée par les routes suit une sémantique attribuée à ces éléments : points clés formant les routes (ex : point de départ), cap d'orientation, relèvement ou alignement sur repères, visibilité d'un repère, validation spatiale des routes, etc. Ces éléments sont caractérisés par des propriétés qui les relient entre eux et qui ne peuvent être négligées. Les propriétés en question interviennent fortement dans la planification. À titre d'exemple, la route est caractérisée par un cap orienté sur un repère. À cet égard, chaque élément de la trajectoire est associé directement ou indirectement à un autre élément. D'autre part, étant donné que le repère est principalement l'axe d'orientation des bateaux, ces propriétés sont dépendantes d'une entité spatiale, temporelle et sémantique. Pour réaliser cette modélisation, nous avons opté pour une structure ontologique. Au-delà de l'avantage qu'elle offre sur la flexibilité des modèles, elle permet d'intégrer les différents axes sur lesquels s'appuie la trajectoire en milieu maritime côtier. Une ontologie se distingue aussi des autres modèles par la formalisation logique qu'elle fournit. Ceci représente un grand avantage dans nos travaux, puisqu'une formalisation logique permet de gérer au mieux les inférences et le raisonnement. En effet, nous avons la possibilité de tester la consistance et la véracité du modèle. En d'autres termes, si un élément de la trajectoire est mal défini dans le modèle, il nous sera possible de détecter l'incohérence. Cette catégorie de modèle met en avant le raisonnement sur

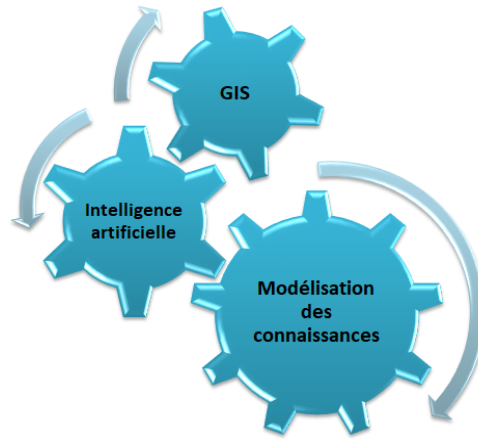


FIGURE 2 – Thématiques scientifiques et domaines applicatifs abordés lors de la thèse

les connaissances formalisées et génère ainsi d'autres connaissances qui enrichissent la sémantique du modèle. Nous tenterons, grâce à cette structure ontologique, de définir les éléments de la trajectoire et de l'environnement et d'intégrer les dimensions spatiale, temporelle et sémantique. La dernière dimension s'appuiera essentiellement sur la sélection des repères en fonction de leur visibilité et sur l'interdépendance des éléments de la trajectoire. Ce modèle doit avoir une finalité qui contribue à l'inférence d'une trajectoire maritime côtière. Pour résumer, trois contributions sont apportées dans les travaux de cette thèse :

- Formalisation logique et modélisation ontologique d'une trajectoire maritime côtière ;
- Enrichissements conceptuel et sémantique pour la sélection des repères en fonction de leur visibilité ;
- Inférences des points clés de la trajectoire grâce à un algorithme de routage.

Au terme de ses contributions, le modèle devra générer un ensemble de trajectoires associées à leur différents éléments de manière à rendre possible l'intégration de ces connaissances dans un système d'information géographique pour de l'aide à la navigation maritime côtière.

En considérant ces contributions et ces challenges scientifiques, nos travaux réunissent la complémentarité de trois différents thématiques scientifiques et domaines applicatifs tels que le résume la Figure 2.

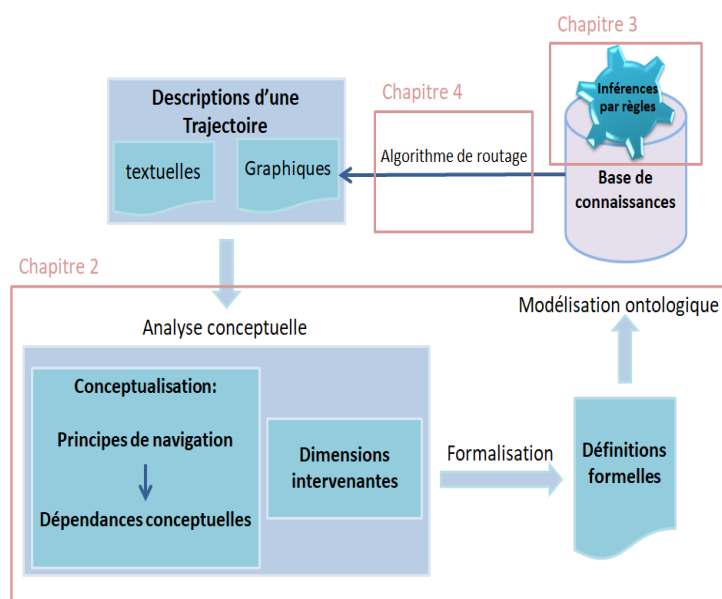


FIGURE 3 – Vue globale des contributions présentées dans les chapitres

## Structure du manuscrit

Afin de mener à bien la lecture du manuscrit, la présentation est scindée en différents chapitres qui décrivent chacune des contributions en les précédant par une littérature succincte relative au contexte dans lequel s'inscrivent les travaux de la thèse. La Figure 3 représente les différentes étapes de la réalisation des travaux et les contributions globales décrites dans chaque chapitre. Nous résumons ci-dessous le plan de lecture de ces chapitres.

- Chapitre 1 : ce chapitre détaille un état de l'art relatif au contexte de wayfinding dans un cadre global. Nous étudierons également dans ce même cadre, les facteurs qui jouent un rôle dans la conception des routes de navigation et influencent leur orientation (aspects théorique et cognitif). Suite à quoi, une comparaison entre des approches qui offrent des solutions est effectuée afin de mettre en évidence des critères de comparaison importants pour notre propre solution.
- Chapitre 2 : ce chapitre consiste à décrire dans un premier temps, les étapes qui nous ont permis de structurer une ontologie qui englobe les principaux concepts de la trajectoire et leurs interactions en navigation maritime côtière. Nous proposons dans ce chapitre, une formalisation fondée sur la logique de description (DL) qui aboutit à

---

une modélisation ontologique à un niveau axiomatique. Ceci impose une description sous format OWL (Web Ontology Language).

- Chapitre 3 : ce chapitre développe un enrichissement de la base de connaissances avec des règles, qui permettent une stratégie d'inférence, en relation avec la notion de visibilité dédiée aux repères. Cette notion sémantique favorise la sélection des « bons » repères à partir d'un point de référence. La stratégie énoncée dans cette partie du manuscrit, s'appuie sur le service de SWRL (Semantic Web Rule Language). Il en résulte un état de visibilité qui contribue à peupler les concepts de l'ontologie qui sont définis selon des conditions dynamiques.
- Chapitre 4 : La planification des trajectoires nécessite généralement l'application d'un algorithme de routage. Ce chapitre va dans ce sens et propose un algorithme qui permet d'exploiter les différentes connaissances modélisées dans l'ontologie, ainsi que les inférences. Ceci permettra la génération des points d'où se fait le changement de cap et par conséquent des routes. Cet algorithme prendra en compte l'analyse spatiale au niveau du parcours afin de filtrer les routes éventuelles.

Tous les chapitres représentant une contribution se concluent par un cas d'utilisation ou un cas d'étude qui permet d'explicitier les résultats obtenus par chaque contribution. La lecture du manuscrit est clôturée par une synthèse des travaux effectués, ainsi que par des perspectives pouvant enrichir nos contributions à court terme ou à long terme.



# Chapitre 1

## Littérature

”Le signe premier de la certitude scientifique, c’est qu’elle peut être revécue aussi bien dans son analyse que dans sa synthèse”

---

Gaston Bachelard

### 1.1 Introduction

En navigation maritime, atteindre une localité prédéterminée  $B$  en partant d’un point  $A$ , nécessite souvent la préparation d’un plan de traversée ou d’une trajectoire à suivre avant de prendre le large, notamment lorsque l’environnement est non-familier aux navigateurs. Ce processus de navigation est semblable à un trajet en milieu urbain. En effet, bien que l’environnement maritime soit un espace ouvert, il est soumis à des règles de navigation non-négligeables pour la sécurité. Cependant, dans un tel environnement, nous ne trouvons pas des panneaux d’indication routière, mais nous nous référons plutôt à des instructions nautiques (afin de prendre connaissance des informations sur l’environnement), des signalisations (pour éviter des zones de danger), des repères visibles (pour une meilleure orientation). Par conséquent, le choix de toute trajectoire est influencé par les différents objets qui composent l’environnement ; en d’autres termes, ces objets ont du sens dans le contexte donné et vont nous dicter l’action à effectuer dans l’optique d’atteindre la destination souhaitée. La question que nous pouvons soulever ici est : quelle trajectoire faut-il suivre pour aller d’un point  $A$  à un point  $B$  en tenant compte de l’environnement qui nous entoure notamment quand ce dernier est complexe (espace ouvert et dynamique) et non-familier ?

Cette problématique applicative relève de la problématique du routage. La résolution de ces problèmes relatifs aux tâches de recherche et de navigation spatiales a été abordée par différentes communautés scientifiques. Ces tâches sont décrites par le terme *pathfinding* dans une littérature orientée recherches opérationnelles ou par le terme *wayfinding* dans des littératures fondées sur la cognition. Le concept abordé dans les deux domaines est le même, la différence est notée dans la modélisation et les approches de résolution. Dans ce qui suit, nous expliciterons les deux domaines pour catégoriser au mieux nos travaux sur la notion de trajectoire en navigation maritime côtière.

## 1.2 Pathfinding vs. Wayfinding

Le terme *pathfinding* est adopté en informatique ou en Intelligence Artificielle (IA). Il décrit le sens pour déterminer le chemin le plus court, le moins coûteux ou le plus rapide entre les nœuds d'un réseau ou dans une problématique spatiale (Mueller et al. (2013)). Les travaux énoncés par Mueller décrivent les capacités d'un agent à trouver le plus court chemin ou le moins exigeant en effort entre des localisations dans un environnement donné. D'ordinaire, ce dernier est analysé et simulé avec un graphe pondéré où les nœuds désignent les localisations à atteindre et les arcs le chemin à parcourir d'un nœud à un autre. D'un point de vue global et dans le cadre de la théorie des graphes, résoudre une problématique de routage revient à appliquer l'un des différents algorithmes proposés dans l'optique d'optimiser la solution (Ahuja et al. (1993)). Parmi ces algorithmes, nous citons les plus classiques comme celui de Dijkstra (1959) qui fournit une solution optimale du plus court chemin (ou le moins coûteux) pour se déplacer d'un nœud à un autre. Bien que l'algorithme garantisse une solution, la complexité en termes de recherche spatiale exhaustive n'est cependant pas intéressante quand la taille du graphe est importante. Pour alternative, des heuristiques comme  $A^*$  sont adoptées (Hart et al. (1968)). Cet algorithme est le plus appliqué et est particulièrement utilisé dans les jeux où le processus du *pathfinding* est appelé à être souvent employé. En plus de son efficacité,  $A^*$  prend en compte les complexités temporelles dans la recherche du chemin ainsi que dans l'exécution de l'algorithme. Des améliorations de cet algorithme sont apparues afin de rendre de meilleurs résultats en temps réel ou en termes de performance dans un environnement non familier (Korf (1990)).

Dans une autre optique de routage qui est le *wayfinding*, les indications d'orientation sont importantes et différents auteurs se sont intéressés à ce processus. Le concept de ce dernier existe depuis le seizième siècle. Le terme

*wayfaring* lui était associé signifiant par ce fait, *voyager à pied vers une destination donnée* (Arthur and Passini (1992a)). Au fil des ans, les architectes ou les spécialistes en cartographie urbaine ou encore les psychologues environnementaux ont introduit le terme *wayfinding* qui est un mixe entre le termes *pathfinder* et *wayfaring*. C'est dans les années soixante que le terme est utilisé pour la première fois par Lynch (1960). Dans son analyse, l'auteur décrit l'identité spatiale d'une cité et quel pourrait être l'impact de la structuration sur sa perception par ses habitants mais également sur la compréhension de son organisation pour établir le lien avec un itinéraire à suivre.

Les recherches sur le *wayfinding* se sont succédées depuis celles de Downs (1970). L'auteur contribue au travail de Lynch et attestent que la perception de l'environnement, la cognition et la prise de décision doivent faire partie du processus d'orientation dans l'espace tout autant que la compréhension des mouvements d'un utilisateur dans un environnement complexe. Ceci enrichie la définition initiale du processus de *wayfinding*. Carpenter (1989) donne une définition assez basique : "*le Wayfinding fait référence aux tâches à faire pour trouver son chemin quelque part*". Quant aux auteurs Arthur and Passini (1992b), ils modélisent le processus comme une problématique spatiale comprenant trois sous-processus interconnectés :

- La prise de décision et l'élaboration du plan de navigation ;
- L'exécution de la décision, qui transforme le plan de navigation en un comportement approprié ;
- Le traitement d'information, la compréhension de la perception d'environnement et de la cognition.

Golledge (1999) définit le *wayfinding* comme « *le processus de déterminer et suivre un chemin ou une route entre une origine et une destination* » et Hendricks et al. (2003) propose que "*Le wayfinding, dans un environnement spatio-temporel, est une tâche complexe résultant de l'existence dynamique et l'emplacement des objets à travers le temps*". En analysant les deux définitions, nous notons l'évolution des travaux associés au *wayfinding* qui est démarquée par l'introduction de la dimension temporelle. En effet, le processus du *wayfinding* peut être plus complexe que le processus décrit par Golledge (1999) en raison des différents facteurs qui peuvent influencer la trajectoire. Ceci explique la définition présentée par Arthur and Passini (1992b) « *le wayfinding est la capacité de trouver son chemin vers une localisation prédéterminée* ». En combinant les trois définitions citées ci-avant, nous pouvons déduire la définition qui suit "*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".*

## 1.3 Facteurs de wayfinding

Selon la dernière définition, une trajectoire est effectuée en respectant différentes contraintes. De ce fait, différents composants influencent le processus de wayfinding. Ils se résument dans les connaissances qui constituent l'environnement ainsi que dans les réglementations à respecter. Bien que ces deux facteurs nous semblent, dans un premier constat, statiques la dimension temporelle les rend dynamiques. Dans ce qui suit, nous allons détailler succinctement les principaux facteurs qui peuvent interférer dans le processus de wayfinding en navigation maritime côtière.

### 1.3.1 Structuration physique de l'environnement

L'organisation physique d'un environnement représente l'impact le plus évident dans le processus de wayfinding. En effet, la structure et l'emplacement d'un objet donné dans l'espace influencent notre prise de décision sur la trajectoire à suivre (ex : la présence d'une épave ou d'un bateau au mouillage est susceptible d'être un danger pour la navigation, car son emplacement dans la zone de navigation peut représenter un obstacle pour notre trajectoire).

Différents travaux se sont focalisés sur l'aspect spatial dans le but d'analyser son impact sur le processus de wayfinding ou encore dans l'optique de proposer des approches qui prennent en considération la structure de l'environnement où nous progressons. Par exemple, les travaux de [Raubal et al. \(1997\)](#) proposent un modèle pour le processus de la structuration de l'espace. Ce modèle représente une aide pour la perception et la compréhension de l'environnement et de ce fait contribue au processus de wayfinding. Ce dernier a fait l'objet de plusieurs recherches dans différents environnements urbains ou dans des structures urbaines (aéroport, hôpital, etc.) ([Timpf \(2002\)](#) [Raubal and Worboys \(1999\)](#) [Farr et al. \(2014\)](#) [Gaisbauer and Frank \(2008a\)](#)). Cette diversification d'espaces démontre l'influence de la structuration de l'environnement ainsi que les objets qui le composent et leurs interactions sur la démarche faite pour arriver à destination. Dans le cas de l'environnement maritime, la structuration de l'espace est moins complexe mais moins intuiti-

tive car la trajectoire ne dépend pas d'un réseau routier de communication ou transport (routier, piéton, aérien, etc.) que nous pouvons suivre. La navigation maritime est principalement fondée sur la perception de l'environnement dont les balisages nous donnent les informations sur la structuration de cet environnement par rapport à des éléments non visibles. Par conséquent, avant d'élaborer un comportement, il est nécessaire d'interpréter le sens renvoyé par les entités qui composent cet environnement.

### 1.3.2 Repères et réglementations

Considérés par [Lynch \(1960\)](#) comme points de référence externes, les repères (en anglais, *landmarks*) permettent à l'être humain de mieux s'orienter dans un environnement non-familier ([Lynch \(1960\)](#)). De ce fait, enrichir le processus de wayfinding avec ce concept permettrait de mieux générer la trajectoire. Cette affirmation a été la perspective de différents travaux de recherche. Ceux présentés par [Elias and Paelke \(2008\)](#) expliquent comment améliorer le wayfinding à l'aide des landmarks représentés sous différentes catégories et avec différents niveaux d'abstraction. Nous trouvons également les travaux de [Li et al. \(2014\)](#) qui visent à enrichir les instructions verbales avec des repères qui ne se trouvent pas uniquement au niveau des points de décision (c.à.d. une jonction où une décision d'orientation est requise ([Elias and Paelke \(2008\)](#))) du navigateur mais également tout au long de la route distants de celle-ci. En d'autres termes, les repères ont été divisés en deux catégories : globaux et locaux. Cette deuxième catégorie a intéressé [Raubal and Winter \(2002\)](#) qui propose des travaux où les landmarks sont d'abord extraits suivant une sémantique puis ajoutés aux instructions. Similaire à ces derniers travaux, l'approche proposée par [Caduff and Timpf \(2005\)](#) repose sur une contribution plus approfondie d'un point de vue cognitif notamment dans le processus de la génération de route avec l'intégration des landmarks. Ces derniers sont représentés sous forme de graphe qui est exploité par la suite. Les travaux cités ici ont fait l'objet de recherches dans l'environnement urbain où l'orientation, suivant le concept de points de référence, ne diffère pas vraiment de l'environnement maritime. Dans ce dernier, l'orientation par rapport à un repère (amer) représente le cap que le navigateur doit suivre (ex : l'approche se fait sur l'alignement à 283°5 de fort Cigogne sur l'amer de *Gueotec* [Rondeau \(2007\)](#)). Avec ces amers, la trajectoire change de direction à des points spécifiques d'où la nécessité d'ajouter ce concept à celui de la structuration de l'espace. En comparant les processus de navigation urbaine et maritime (côtière), nous ne pouvons que confirmer la conclusion à laquelle sont arrivés les auteurs [Michon and Denis \(2001\)](#) qui soulignent l'intérêt des landmarks dans trois

processus impliqués dans le wayfinding :

- signaler à quel endroit une action doit être effectuée,
- aider la localisation du prochain repère, et
- garantir au navigateur qu’il se trouve sur le bon chemin.

Par ailleurs, lors d’une progression dans un environnement, nous prenons en considération la réglementation et les signalisations (panneau de déviation, chemin spécifique pour une catégorie de locomotion, etc.). Ces derniers peuvent d’un côté compromettre ou contraindre notre navigation (ex : lors de la levée d’un pont nous sommes contraints de changer de direction pour atteindre notre destination) et d’un autre côté facilite et sécurise notre décision sur l’orientation à effectuer dans l’environnement sans danger (ex : bouées cardinales qui nous dictent l’action à effectuer dans l’environnement maritime afin d’éviter un danger). L’exemple du pont cité ci-dessus clarifie nettement le dynamisme d’un environnement car le pont n’est pas indéfiniment levé et de ce fait, la contrainte n’est pas toujours valable.

### 1.3.3 Dimension temporelle

Les facteurs décrits précédemment sont reliés à l’environnement qui nous entoure et ils sont de nature physique qui nous semble statique. Cependant, des changements peuvent s’opérer au niveau de ces facteurs à travers le temps comme l’altération de la structuration de l’espace ou des repères faisant en conséquence émerger ou dissiper obstacles ou landmarks. Ces modifications ont une répercussion sur la prise de décision quand à l’action à effectuer pour trouver notre chemin. En d’autres termes, la dimension temporelle rend l’environnement dynamique et toute orientation dépend d’une structuration spatio-temporelle. Le navigateur doit donc se projeter dans le temps et prévoir toute modification qui interfère avec le processus décisionnel. [Hendricks et al. \(2003\)](#) se sont concentrés sur cet aspect spatio-temporel de l’environnement en proposant une modélisation qui aborde la structuration et la description spatio-temporelle et ce en introduisant des primitives (vitesse, point de départ, etc.) relatives aux différents changements susceptibles de survenir dans une période de temps.

L’intégration de la dimension temporelle dans une modélisation de l’environnement maritime est primordiale et les guides nautiques nous le confirment. Différentes instructions sont en effet associées à des indicateurs

temporels pour décrire l'état d'une structure spatiale ou d'un objet à un instant donné ou sur un intervalle de temps. Cet état incitera le navigateur à adopter ou pas un comportement (ex : « ...cette entrée de nuit est à déconseiller par mer un peu agitée » explique l'auteur [Rondeau \(2007\)](#) en parlant de la rivière de Belon). Dans cet exemple, la dimension temporelle désignée par *nuit* a une influence évidente sur l'action à effectuer par le navigateur (accéder ou pas).

A travers ces facteurs, nous pouvons spécifier les étapes globales du processus de wayfinding. Ces étapes font référence à une correspondance entre les connaissances spatiales qui nous entourent et le comportement cognitif que nous devons adopter à travers le temps. Explicitement, chaque étape de wayfinding correspond à l'exécution d'une action qui découle d'une analyse de l'environnement à un instant donné comme décrit dans le schéma de la Figure 1.1.

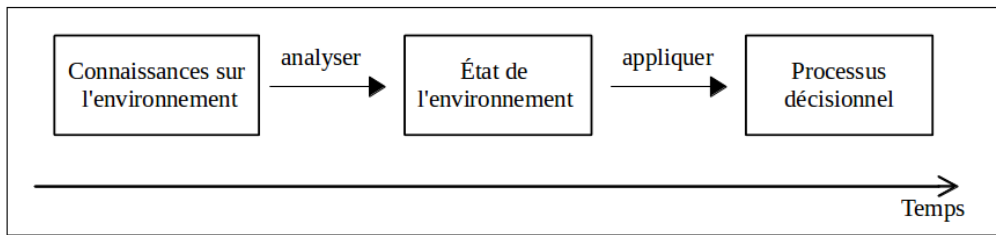


FIGURE 1.1 – Étapes globales de processus wayfinding

Pour résumer, le processus décisionnel s'exécute par la prise en compte des principaux facteurs en observant l'organisation de l'espace et les repères sans omettre la dimension temporelle qui les rend dynamiques. Nous constatons que le processus de wayfinding est bien complexe vu les différentes associations existantes entre les facteurs (ex : interaction entre les objets qui composent l'environnement). Pour modéliser ce processus, il faut donc passer par la modélisation et la formalisation de chaque facteur avec les éventuels aspects cognitifs associés. Concernant ces aspects cognitifs, nous nous limiterons aux notions de saillance et d'affordance.

#### 1.3.4 Influence de la saillance et de l'affordance

Comme étant un atout et une clé dans la navigation ou l'orientation dans l'espace, les repères sont des entités spatiales qui peuvent être localisées n'importe où dans l'espace. Dans le contexte de wayfinding, nous les

considérons selon leurs pertinences pour nous guider vers la destination souhaitée. Cette pertinence se distingue par des caractéristiques propres à chaque repère qui doit être une entité spatiale remarquable et ne se fond pas dans le paysage. La singularité des repères est décrite dans les travaux de [Sorrows and Hirtle \(1999\)](#) par trois propriétés qui reposent sur la saillance : saillance visuelle, saillance cognitive et saillance structurelle. La première typologie correspond à toutes les propriétés visuelles qui identifient un landmark (couleur, architecture, etc.). La saillance cognitive comprend le sens que peut véhiculer un repère. Ce dernier est susceptible de concevoir différentes saillances de cette même typologie et ce selon la familiarité avec l'environnement ou la culture d'une personne. La dernière catégorie ne fait pas référence comme son nom l'indique à la structure des repères, qui est plutôt dans la catégorie visuelle, mais elle correspond à la localisation dans la structure spatiale. Suivant ces mêmes travaux, [Raubal and Winter \(2002\)](#) proposent la même classification où la saillance cognitive est désignée par la saillance sémantique dû au sens qu'elle nous transmet.

Dans l'optique d'intégrer le concept de repère dans les services proposés pour le wayfinding, il est fondamental de passer par une formalisation des landmarks. Pour ce faire, différents travaux se sont penchés sur la question du choix des repères en formalisant des mesures pour la saillance. Cette mesure permet de démarquer un repère parmi d'autres selon l'attraction qu'il exerce dans son environnement sur un individu. Les initiatives de [Raubal and Winter \(2002\)](#) permettent d'avoir une valeur quantitative pour les trois saillances. Pour chaque saillance, diverses propriétés lui sont attribuées pour une meilleure stratégie de comparaison entre les repères. Nous trouvons dans la catégorie de la saillance visuelle, une mesure pour la surface de l'objet, une autre pour la forme d'où est dérivée une valeur qui correspond au facteur pour déterminer si la hauteur est imposante, ainsi qu'une valeur pour représenter la variation de la forme qui est désignée par la différence entre les surfaces du landmark et du rectangle minimal l'englobant. Les auteurs ont également défini une mesure pour les couleurs décrites avec un triplet RGB et enfin la visibilité. Pour la deuxième catégorie qui caractérise l'aspect sémantique de la saillance, elle est valorisée avec des valeurs booléennes spécifiant si oui ou non le repère a une importance culturelle ou historique. De plus, une notation suivant une échelle numérique est définie pour raffiner cette importance. Une autre valeur booléenne est ajoutée à la description de cette saillance. Elle désigne un repère ayant ou pas une marque explicite (par exemple, les supers marchés). Une fois toutes les mesures calculées, un vecteur pour tous types de saillance est défini et à partir de ce dernier, un poids est attribué à chaque landmark

(local). Cette pondération permet ainsi de choisir le repère le plus pertinent. Mais bien que l'aspect cognitif est inclus, ce qui représente un grand pas dans la formalisation de la saillance, l'approche n'admet pas l'aspect temporel qui est un facteur non négligeable. De plus, pour la saillance structurelle, les auteurs s'appuient sur les spécificités spatiales définies par [Lynch \(1960\)](#). Ce dernier représente la structure en se basant sur un réseau routier ce qui n'est pas le cas dans nos travaux puisque l'environnement maritime est considéré comme un environnement ouvert semi-structuré.

Pour la même perspective d'enrichir les instructions de wayfinding, [Winter \(2003\)](#) introduit une autre mesure représentant l'aspect cognitif de *la visibilité par avance* qui peut être combinée avec les autres mesures de saillance. Cette nouvelle mesure permet de favoriser les repères qui peuvent être perçus avant le point de réorientation où plusieurs choix de direction sont accessibles. Pour un utilisateur, cette nouvelle notion l'aiderait à être plus rassuré par rapport au chemin à prendre. L'inconvénient dans cette démarche rejoint celui des travaux de [Raubal and Winter \(2002\)](#) et qui réside dans l'omission de la dimension temporelle. La réflexion sur cette dernière a ramené les auteurs [Winter et al. \(2004\)](#) à considérer la condition de saillance de nuit et de jour tout en incluant l'avis de l'utilisateur pour mieux comprendre leurs comportements. Le facteur de la visibilité a aussi fait l'objet d'une mesure dans l'étude effectuée par [Elias and Sester \(2006\)](#).

Les progrès des technologies actuelles, notamment les smartphones connectés à internet, ont fait émerger une autre idée pour affiner les recherches relatives à la formalisation de l'attractivité des repères. Récemment, l'approche proposée par [Quesnot and Roche \(2015\)](#) contribue à l'amélioration de la saillance sémantique qui selon les auteurs favorisera la compréhension des connaissances géographiques locales. Pour ce faire, la démarche vise à attribuer un score à des repères en se basant sur les réseaux sociaux (par exemple, le nombre de personnes ayant été à un restaurant ou un monument peuvent commenter ou attribuer un "*like*" pour certains passages. Ceci représente une pondération valorisant la saillance de l'entité spatiale). Nous pouvons constater que toutes ces méthodes reflètent un aspect cognitif qui permet de choisir les repères les plus importants pour influencer notre orientation. Ces méthodes sont basées sur des statistiques, autrement dit, l'aspect cognitif est décrit par des valeurs numériques représentant une pondération qui résulte de différentes formules.

Dans le contexte de wayfinding, les décisions quant aux directions à prendre sont provoquées par les entités que nous croisons sur notre chemin.

En milieu urbain, les éléments du code de la route nous incitent à effectuer certaines actions pour une navigation sans risque. Dans l’environnement maritime, la tâche de réglementation et d’orientation pour éviter le danger et accéder aux ports revient au balisage. De ce fait, le navigateur doit comprendre les propriétés de ces objets pour une interaction spatiale avec les règles. Cette interaction est définie par [Norman \(1988\)](#) avec le terme *affordance*. Norman la spécifie comme étant *une relation entre un objet physique et une personne* car la fonction de l’objet caractérise la relation. Par exemple dans l’environnement urbain, le feu rouge a pour fonction de stopper les passagers. Dans l’environnement maritime, le feu rouge est associé au côté bâbord. Ce qui donne la possibilité de connaître le sens dont se présente un bateau de nuit. Nous pouvons dire que pour un même objet, il existe deux différentes fonctions selon l’environnement ce qui explique la définition de [Raubal and Worboys \(1999\)](#) qui stipule que l’affordance est ce qu’un objet, un assemblage d’objet ou *un environnement* permet aux personnes de faire. Les auteurs de ces derniers travaux ([Raubal and Worboys \(1999\)](#)) mettent en évidence le fort lien existant entre le processus de wayfinding dans une bâtisse et l’affordance. Cette dernière représente l’ensemble des informations qu’elle véhicule et les actions qu’elle autorise. Un peu plus tard, Raubal consacre ses recherches sur le comportement humain dans le processus de wayfinding et simule la démarche avec des agents cognitifs tout en considérant l’influence de l’affordance. En outre, l’auteur suppose que l’affordance peut être physique (ex : un chenal nous incite à le traverser) ou bien mentale (ex : un point d’intérêt nous incite à nous orienter sur un alignement particulier).

## 1.4 Aspects théoriques

Après avoir explicité les différents facteurs qui sont susceptibles d’influencer un itinéraire, nous allons maintenant aborder diverses théories qui portent dans un premier temps sur les relations topologiques, d’orientation. ensuite nous nous focaliserons sur l’aspect cognitif relatif aux repères. enfin nous terminerons par le formalisme adopté pour la dimension temporelle.

### 1.4.1 Formalismes spatiaux

Pour générer un itinéraire dans le cadre de nos travaux, il faut se référer aux systèmes d’informations maritimes dont le principe des formalisations d’informations spatiales est fondé sur les sciences de l’information géographique. A travers le temps, deux catégories de représentation se sont distinguées : les informations sont sous un format numérique dit *raster* (ex :

les image satellites) ou un format dit *vecteur*. Ce dernier est codé à partir de primitives géométriques que sont les lignes, les points et les polygones (régions). Pour procéder aux requêtes et répondre aux besoins des utilisateurs, différents travaux se sont orientés vers la formalisation des informations spatiales, décrivant ainsi plusieurs relations pouvant exister entre les objets dans leur aspect géographique. Ces formalisations connaîtront de multiples améliorations afin de permettre un meilleur raisonnement pour un meilleur requêtage. Nous présenterons dans la prochaine sous section les théories les plus répandues dans la modélisation de l'espace notamment d'un point de vue qualitatif et ce pour les différentes relations géographiques (topologique, orientation, distance).

#### 1.4.1.1 Relations topologiques

La topologie a fait l'objet de beaucoup de recherches dans le domaine des sciences de l'information géographique. Cet intérêt est dû à son importance dans la représentation des entités ainsi qu'au raisonnement déduit à partir des interactions existantes entre différents objets. Dans ce contexte, plusieurs approches ont contribué à la résolution de la problématique liée à la représentation et au raisonnement dans l'espace. La plupart des travaux sont influencés essentiellement par les mathématiques incluant la théorie des ensembles ou encore la logique. Les recherches menées par [Clark \(1981, 1985\)](#) sont fondées sur une logique formelle. En effet, l'auteur liste plusieurs théorèmes prouvables en définissant des axiomes et des prédicats. Ces derniers se basent sur la notion qui stipule que deux régions sont connectées ou pas d'où la définition de la relation « (X est connecté à Y) » ou encore « (X et Y partage un point en commun) » dans le cas où la région est considérée comme étant un ensemble de points. Ces mêmes travaux ont conduit à l'apparition de la représentation la plus utilisée : *Region Connection Calculus (RCC)* ([Randell and Cohn \(1989\)](#); [Randell et al. \(1992\)](#); [Cohn et al. \(1997\)](#); [Cohn \(1997\)](#)). La différence entre ces travaux et ceux de [Clark \(1981\)](#) repose sur le formalisme exprimé qui est plus simple et plus intuitif (axiomes avec logique du premier ordre) mais aussi sur une notion qui permet de différencier l'extérieur et l'intérieur des régions, ce qui facilite la modélisation du monde réel. Les possibles interactions entre deux objets a conduit à la définition de plusieurs relations (Table 1.1) faisant évoluer de ce fait le formalisme de la théorie RCC grâce à des prédicats qui introduisent huit relations topologiques de base d'où l'annotation RCC-8 (Figure 1.2). Ces relations sont fondées sur celle exprimant la connexion

entre deux régions (X et Y) spécifiée avec le prédicat  $C(x,y)$ <sup>1</sup>.

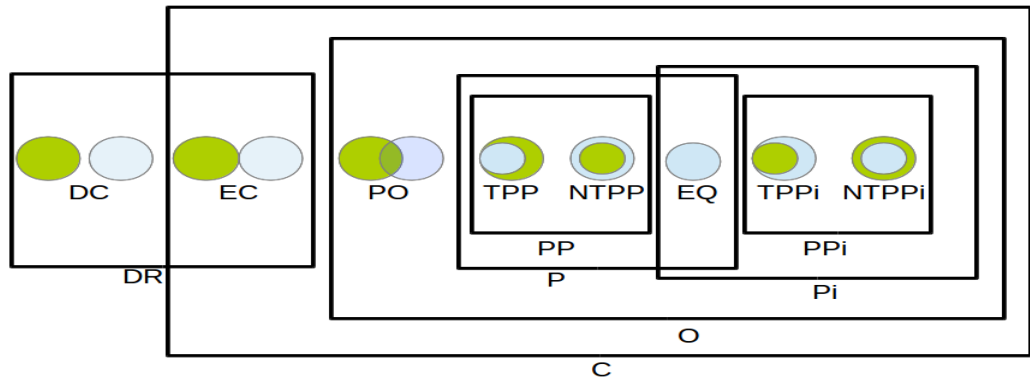


FIGURE 1.2 – Taxonomie des relations RCC<sup>2</sup> formant les huit relations de base

---

1.  $C(x,y)$  est une relation réflexive et symétrique

2. Les relations  $P, PP, TPP$  et  $NTTP$  admettent respectivement les relations inverses  $P_i, PP_i, TPP_i$  et  $NTTP_i$

| Relation     | $\equiv_{def}$ axiomes                                     | interprétation                                  |
|--------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $DC(x, y)$   | $\neg C(x, y)$                                             | les deux régions sont déconnectées              |
| $P(x, y)$    | $\forall z(C(z, x) \rightarrow c(z, y))$                   | x est une partie de y                           |
| $PP(x, y)$   | $P(x, y) \wedge \neg P(y, x)$                              | x est une “partie propre” de y                  |
| $O(x, y)$    | $\exists z[P(z, x) \wedge P(z, y)]$                        | x superpose y                                   |
| $DR(x, y)$   | $\neg O(x, y)$                                             | x est “discrete” de y                           |
| $EC(x, y)$   | $C(x, y) \wedge \neg O(x, y)$                              | les deux régions sont connectées à l’extérieur  |
| $TPP(x, y)$  | $PP(x, y) \wedge \exists z[EC(z, x) \wedge EC(z, y)]$      | x est “partie propre” tangentielle à y          |
| $NTTP(x, y)$ | $PP(x, y) \wedge \neg \exists z[EC(z, x) \wedge EC(z, y)]$ | x est “partie propre” non-tangentielle à y      |
| $EQ(x, y)$   | $P(x, y) \wedge P(y, x)$                                   | les deux régions sont identiques                |
| $PO(x, y)$   | $O(x, y) \wedge \neg P(x, y) \wedge \neg P(y, x)$          | les deux régions sont partiellement superposées |

TABLE 1.1 – Récapitulatif des relations topologiques

Dans la représentation des relations topologiques, nous trouvons également des travaux qui sont fondés sur d’autres théories, notamment la modélisation de [Egenhofer and Herring \(1991\)](#) fondée sur différentes intersections d’où l’appellation *n-intersections*. Chaque intersection représente l’espace en commun existant entre deux régions X et Y. Cet espace est

désigné dans des recherches préliminaires entre seulement l'intérieur et les contours des deux régions à comparer. Mais afin d'affiner la distinction entre les relations topologiques, des recherches ultérieures incluent l'extérieur des régions. Par conséquent, la théorie aboutit à la définition d'une matrice  $n \times n$  caractérisant 4-intersections ou 9-intersections selon la prise en considération ou pas de l'extérieur des objets (Egenhofer et al. (1993)). En prenant en compte les relations topologiques pouvant réellement exister dans un espace à 2D, les matrices résultantes peuvent être réduites à huit matrices correspondant aux huit relations de base du *RCC* – 8 comme indiqué dans la Table 1.2 sachant que chaque matrice est définie en suivant le formalisme ci-après, avec X et Y deux régions et  $R(X,Y)$  une relation topologique entre les deux régions.

**4 intersections Egenhofer and Herring (1991)** : intersections entre l'intérieur et le contour de deux régions

$$R(X, Y) = \begin{pmatrix} X \cap Y & X \cap \partial Y \\ \partial X \cap Y & \partial X \cap \partial Y \end{pmatrix}$$

où  $\partial X$  représente le contour de la région X et  $X$  l'intérieur de la région X.

**9 intersections Herring et al. (1994)** : intersections entre l'intérieur, le contour et l'extérieur de deux régions

$$R(X, Y) = \begin{pmatrix} X \cap Y & X \cap \partial Y & X \cap Y^- \\ \partial X \cap Y & \partial X \cap \partial Y & \partial X \cap Y^- \\ X^- \cap Y & X^- \cap \partial Y & X^- \cap Y^- \end{pmatrix}$$

où  $X^-$  représente l'extérieur de la région X.

Dans Egenhofer et al. (1993), il a été démontré que le modèle des 9-intersections fournit d'importantes connaissances quand il est question de spécifier des aspects sémantiques dans le requêtage des SIG.

#### 1.4.1.2 Relation d'orientation

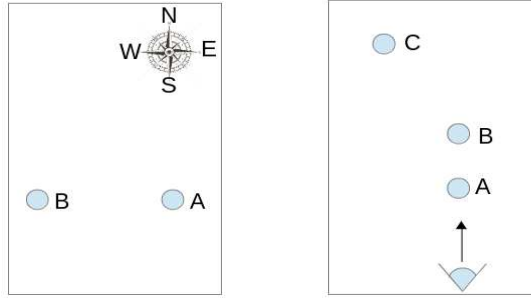
Tout comme les relations topologiques, le positionnement des objets et leur orientation dans l'espace a également suscité l'attention de la communauté scientifique de la modélisation spatiale mais avec beaucoup plus d'intérêt. De ce fait, plusieurs approches et hypothèses ont été proposées dans l'objectif d'avoir un meilleur raisonnement avec un minimum de complexité. Intuitivement, exprimer une relation d'orientation revient à positionner un

| Relations topologiques                                                                       | 4-intersections                                                                                | 9-intersections                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>DC      | $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset \end{pmatrix}$                 | $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$                 |
| <br>EC      | $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$             | $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$             |
| <br>PO      | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ |
| <br>TPP     | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$     | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$             |
| <br>NTPP  | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset \end{pmatrix}$         | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$                 |
| <br>EQ    | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$         | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$                         |
| <br>TPPi  | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$     | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$             |
| <br>NTPPi | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset \end{pmatrix}$         | $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$                 |

TABLE 1.2 – les relations topologiques avec la théorie de n-intersection

objet B par rapport à un objet A. Ainsi, l'objet B est dit l'objet ciblé alors que l'objet A est dit de référence. Suivant la littérature la plus connue, le problème peut être abordé par des approches fondées sur soit des modèles absolus, exprimés par des relations binaires (ex : la région B est à l'ouest de

la région A) (Figure 1.3a), ou des modèles relatifs exprimés quant à eux par des relations ternaires dûes à la prise en considération d'un point de vision (ex : la région C est à gauche de la région B si vous orientez votre perception de l'espace de A vers B) (Figure 1.3b).



(a) Relations absolues      (b) Relations relatives

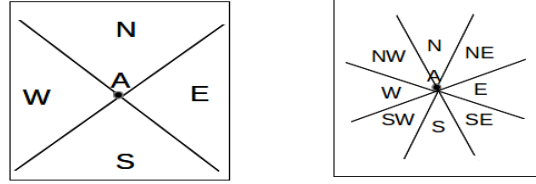
FIGURE 1.3 – Catégories de relations d'orientation

Une relation est dite absolue lorsque la localisation des entités spatiales dépend d'orientations prédéfinies (ex : les points cardinaux). Dans cette catégorie de relations, nous présentons les travaux de Frank (1991) où la modélisation cardinale est réalisée avec deux méthodes différentes : une basée sur des formes à cônes (des surfaces triangulaires), l'autre fondée sur un système de projection. Comme illustré dans la Figure 1.4, la formalisation basée sur les formes à cônes consiste à diviser l'espace en quatre parties ( $90^\circ$ ) (Figure 1.4a) sous forme triangulaire pour le Nord (N), Sud (S), Est (E) et Ouest (W) ou bien en huit parties ( $45^\circ$ ) (Figure 1.4b) pour quatre additionnelles directions Nord-Est (NE), Nord-Ouest (NW), Sud-Est (SE) et Sud-Ouest (SW). En vue de définir la direction d'un objet, l'auteur établit des propriétés algébriques et le système suit le sens des aiguilles d'une montre, par exemple,  $\text{dir}^3(\text{N})=\text{E}$  pour les 4-partitions et  $\text{dir}(\text{N})=\text{NE}$  pour les 8-partitions. Dans les deux systèmes (quatre ou huit partitions), l'auteur introduit une notion de point de référence qui désigne l'origine du système.

La deuxième méthode (Figure 1.5) repose également sur un partitionnement. La différence avec celle fondée sur les cônes réside dans la procédure de division de l'espace. Dans cette méthode à base de projection, il est question de le diviser en s'appuyant sur une ligne verticale pour représenter les directions N et S, ainsi que sur une ligne horizontale pour représenter les directions E et W. L'intersection des deux lignes représente le point de référence.

---

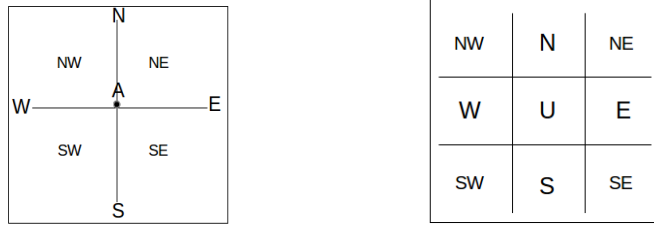
3. dir : direction



(a) Modèle à 4 cônes (b) Modèle à 8 cônes

FIGURE 1.4 – Modèles à base de cônes

Ce partitionnement recouvre quatre régions correspondant aux quatre directions secondaires (NE, NW, SE et SW). Les directions principales (N, S, E et W) quant à elles, sont repérées sur les lignes (Figure 1.5a). Pour améliorer les inférences du système, l'auteur introduit une 9<sup>e</sup> direction (neutre) correspondant à la région du point de référence (Figure 1.5b).



(a) Projection avec 8 directions (b) Projection avec zone neutre

FIGURE 1.5 – Modèles à base de projection

### 1.4.2 Raisonnement

Dans un espace à grande échelle, le raisonnement spatial est primordial car les inférences sur les propriétés spatiales des entités constituant l'environnement ne peuvent pas être déduites par un simple point de vue, particulièrement pour les relations qualitatives. Dans ce qui suit, nous allons orienter notre discussion sur les théories de raisonnement les plus connues dans la littérature pour les deux relations qualitatives évoquées précédemment.

| $R1 \circ R2$ | DC           | EC                               | PO        | TPP                        | NTPP     | $TTP_i$                          | $NTTP_i$     | EQ       |
|---------------|--------------|----------------------------------|-----------|----------------------------|----------|----------------------------------|--------------|----------|
| DC            | /            | DR<br>PO<br>PP                   | DR PO PP  | DR<br>PO<br>PP             | DR PO PP | DC                               | DC           | DC       |
| EC            | DR PO $PP_i$ | DR<br>PO<br>TPP<br>$TTP_i$<br>EQ | DR PO PP  | EC<br>PO<br>PP             | PO PP    | DR                               | DC           | EC       |
| PO            | DR PO $PP_i$ | DR<br>PO<br>$PP_i$               | /         | PO<br>PP                   | PO PP    | DR<br>PO<br>$PP_i$               | DR PO $PP_i$ | PO       |
| TPP           | DC           | DR                               | DR PO PP  | PP                         | NTPP     | DR<br>PO<br>TPP<br>$TTP_i$<br>EQ | DR PO $PP_i$ | TPP      |
| NTPP          | DC           | DC                               | DR PO PP  | NTPP                       | NTPP     | DR<br>PO<br>PP                   | /            | NTPP     |
| $TTP_i$       | DR PO $PP_i$ | EC<br>PO<br>$PP_i$               | PO $PP_i$ | PO<br>TPP<br>$TTP_i$<br>EQ | PO PP    | $PP_i$                           | $NTTP_i$     | $TTP_i$  |
| $NTTP_i$      | DR PO $PP_i$ | PO<br>$PP_i$                     | PO $PP_i$ | PO<br>$PP_i$               | O        | $NTTP_i$                         | $NTTP_i$     | $NTTP_i$ |
| EQ            | DC           | EC                               | PO        | TPP                        | NTPP     | $TTP_i$                          | $NTTP_i$     | EQ       |

TABLE 1.3 – Raisonnement et composition de relations RCC8 [Cohn et al. \(1997\)](#)

### 1.4.2.1 Raisonnement sur les relations topologique

Afin de déduire de nouvelles informations topologiques qui relient les objets dans l'espace, il est nécessaire de passer par une étape de raisonnement. Dans cette optique, les travaux de (Egenhofer and Herring (1991), Cohn et al. (1997)) ont abouti à la définition de compositions de relations, établies à partir du modèle RCC8. Pour ce faire, les auteurs partent de la notion qui stipule que s'il y a une relation  $R1(x,y)$  et une relation  $R2(y,z)$  alors une relation  $R3(x,z)$  peut être inférée. Suivant la taxonomie des relations topologiques (Figure 1.2), les relations que peut prendre  $R3$  sont représentées dans la table de composition (Table 1.3).

Certains résultats mentionnés dans cette table sont déduits à partir des inférences traduites dans la Figure 1.2. Par exemple :

$$\begin{aligned}
 NTPP_i \circ NTPP &= O \iff NTPP_i \circ NTPP = PO \vee P \vee P_i \\
 &\iff NTPP_i \circ NTPP = PO \vee PP \vee EQ \vee PP_i \\
 &\iff NTPP_i \circ NTPP = PO \vee TPP \vee NTPP \vee \\
 &EQ \vee TPP_i \vee NTPP_i
 \end{aligned}$$

### 1.4.2.2 Raisonnement sur les relation d'orientation

comme pour les relations topologiques, les relations de direction ont fait office de raisonnement. Dans la présente littérature, nous avons implicitement distingué entre les formalisations suivant le modèle de projection et le modèle à base de cônes. Nous présentons dans les Tables 1.4 et 1.5 une comparaison entre les deux formalismes lorsqu'ils sont exploités pour le raisonnement.

| $R1 \circ R2$ | N  | NE | E  | SE | S  | SW | W  | NW | O  |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| N             | N  | n  | ne | o  | o  | o  | nw | nw | N  |
| NE            | n  | ne | ne | e  | o  | o  | o  | n  | NE |
| E             | ne | ne | E  | e  | se | o  | o  | o  | E  |
| SE            | o  | e  | e  | SE | se | s  | o  | o  | SE |
| S             | o  | o  | se | se | S  | s  | sw | w  | S  |
| SW            | o  | o  | o  | s  | s  | SW | sw | w  | SW |
| W             | nw | o  | o  | o  | sw | sw | W  | w  | W  |
| NW            | n  | n  | o  | o  | o  | w  | w  | NW | NW |
| O             | N  | NE | E  | SE | S  | SW | W  | NW | O  |

TABLE 1.4 – Composition de relations de direction (avec cônes) Frank (1996)

| $R1 \circ R2$ | N  | NE | E  | SE | S  | SW | W  | NW | O  |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| N             | N  | N  | NE | e  | o  | w  | NW | NW | N  |
| NE            | NE | NE | NE | e  | e  | o  | n  | n  | NE |
| E             | NE | NE | E  | SE | SE | s  | o  | n  | E  |
| SE            | e  | e  | SE | SE | SE | s  | s  | o  | SE |
| S             | o  | e  | SE | SE | S  | SW | SW | w  | S  |
| SW            | w  | o  | s  | s  | SW | SW | SW | w  | SW |
| W             | NW | n  | o  | s  | SW | SW | W  | NW | W  |
| NW            | NW | n  | n  | o  | w  | w  | NW | NW | NW |
| O             | N  | NE | E  | SE | S  | SW | W  | NW | O  |

TABLE 1.5 – Composition de relations de direction (avec projection) [Frank \(1996\)](#)

[Frank \(1996\)](#) a bien mis en avant l'importance d'introduire le symbole d'identité (O) qui permet d'augmenter le nombre de cas où il est possible d'inférer une relation  $R3(x,z)$  en ayant connaissances des relations  $R1(x,y)$  et  $R2(y,z)$ . De plus, la comparaison établie permet de constater que le modèle de projection admet plus de cas exacts comme résultats de composition que le modèle à base de cônes avec moins de valeurs d'identité (O). En outre, les résultats de l'implémentation n'ont fait que confirmer les résultats théoriques ([Frank \(1996\)](#)).

### 1.4.3 Formalisme temporel

La représentation des concepts du monde réel ne peut pas être conçue sans tenir compte de la dimension temporelle. Par ailleurs, cette dernière permet de connaître l'état du système modélisé à tout instant ou durant un laps de temps. Les travaux les plus exploités sont ceux de [Allen \(1983\)](#) qui a introduit un modèle formel qui permet de représenter et de raisonner sur cette dimension. La méthode de l'auteur est fondée sur des périodes (intervalles) car Allen interprète un instant (un point) comme étant une période très brève. Ce n'est pas le cas des travaux de [Vilain \(1982\)](#) où la représentation intègre aussi le concept de point (instant) mais l'inconvénient de cette dernière méthode demeure dans la non analyse de cette intégration. Ainsi, Allen prend comme primitive les intervalles et établit sept relations et leurs inverses. La Table 1.6 identifie les relations qui peuvent exister entre deux intervalles de temps.

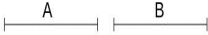
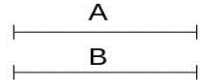
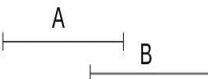
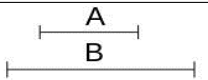
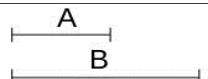
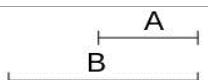
| Relations primitives | symboles | inverses | illustrations                                                                       |
|----------------------|----------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| A before B           | $<$      | $>$      |   |
| A equals B           | $=$      | $=$      |   |
| A meets B            | $m$      | $m_i$    |   |
| A overlaps B         | $o$      | $o_i$    |   |
| A during B           | $d$      | $d_i$    |   |
| A starts B           | $s$      | $s_i$    |   |
| A finished B         | $f$      | $f_i$    |  |

TABLE 1.6 – Les relations temporelles d’Allen (Allen’s interval algebra)

Comme illustré dans la Table 1.6, Allen développe ces relations et les interprète selon leur disjonction d’où résultent 13 relations (relations primitives et leurs inverses). Par exemple, la relation *A before B* signifie que la période de temps A apparaît en réalité avant la période de temps B. Cette représentation est intuitive et permet de modéliser différentes actions qui se produisent dans le temps. Cependant, certaines actions sont plutôt instantanées. Ce constat amène les auteurs [Allen and Hayes \(1985\)](#) à considérer le concept de point dans la formalisation. Pour ce faire, les travaux exploitent deux propriétés d’un intervalle qui représentent : le *debut* désigné par *BEGIN* et la fin de la période désignée par *END*. Ainsi, les relations peuvent être définies avec des axiomes qui introduisent le concept de point et en conséquence les actions instantanées. Par exemple  $A \text{ meet } B \iff \text{END}(A) = \text{BEGIN}(B)$  ce qui se traduit par : la période de A *touche* la période B via un point.

L’optique ici n’est pas seulement de modéliser la connaissance temporelle mais le raisonnement fait également partie de la perspective de la communauté de l’intelligence artificielle. Avec le modèle défini par Allen, il est

possible d'aboutir à des inférences pour d'éventuelles transitivités de relations. Bien que l'implémentation semble simple dans ce raisonnement et que l'expressivité soit intuitive, les inférences sont néanmoins complexes.

Ci-dessus, nous avons abordé les facteurs qui influencent la démarche de wayfinding et ceci concerne la structuration spatiale, les repères, les réglementations ainsi que la dimension temporelle qui engage le dynamisme du système (la nuit, le jour, les saisons, etc.). Ensuite, nous avons succinctement évoqué les aspects théoriques ayant contribué à la formalisation et la représentation explicite ou implicite associées à ces facteurs. L'aspect cognitif est également mentionné et résulte de la perception de l'environnement nous entourant. il en découle le raisonnement, la saillance et l'affordance.

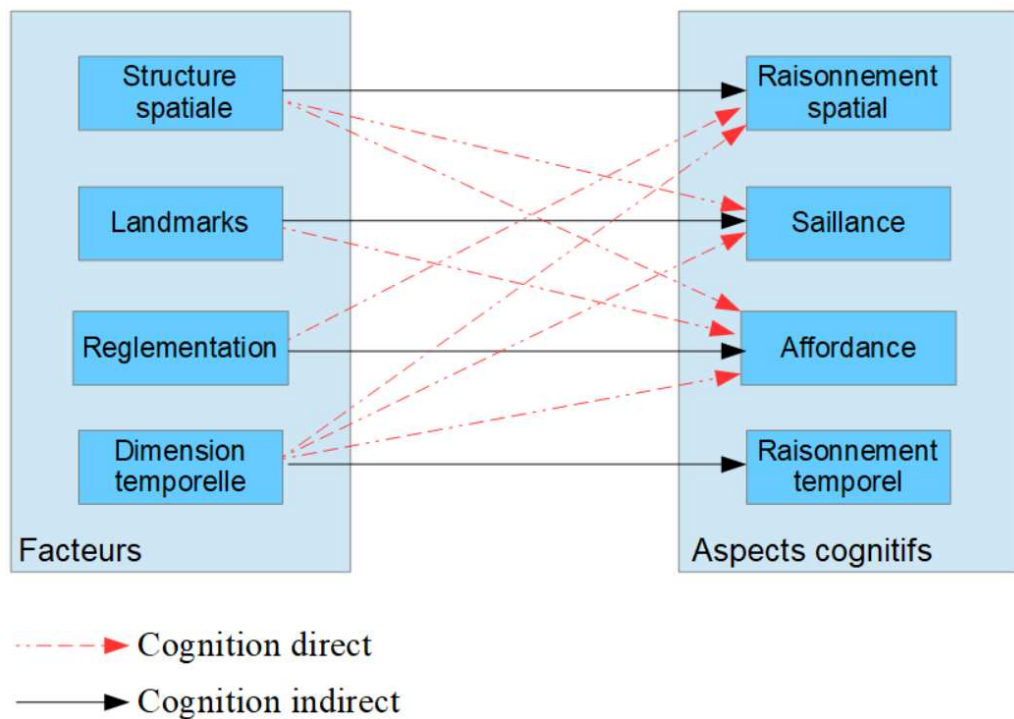


FIGURE 1.6 – Liens cognitifs des facteurs impliqués dans le processus de wayfinding

#### 1.4.4 Importance de la cognition

La Figure 1.6 résume les liens directs ou indirects existant entre l'environnement et la cognition dans le processus de wayfinding et ce dans notre contexte de navigation maritime côtière. Les associations directes sont

intuitives comme la dimension spatiale qui est corrélée au raisonnement spatial (direction ou topologie), les repères à la saillance, les réglementations à l'affordance (chaque réglementation incite le navigateur à faire une action donnée ce qui correspond à l'affordance) et enfin, la dimension temporelle au raisonnement temporel.

En ce qui concerne les associations indirectes, elles sont déduites suite à la littérature présentée. La structuration spatiale peut en effet influencer la saillance. Par exemple, l'emplacement d'un objet singulier dans un environnement, peut le rendre saillant comparé aux autres objets qui l'entourent (saillance structurelle). Aussi, la dimension spatiale risque d'obliger l'exécution d'une action ce qui correspond indirectement à une affordance (ex : le chenal, qui représente une structuration spatiale, nous incite à le traverser). Similaire à cette déduction, les landmarks font aussi référence à l'affordance car un repère donné peut par exemple nous obliger à suivre un alignement. En évoquant les réglementations, nous les avons explicitement associé à l'affordance car elles constituent les actions à exécuter. Cependant, si nous analysons ces actions, elles peuvent aussi dériver de certains objets qui nous incitent à prendre une direction (ex : bouée cardinales). Ainsi, nous devons indirectement faire appel au raisonnement sur les relations d'orientation pour déduire le comportement à adopter face aux réglementations. Enfin, l'aspect temporel interfère sur tous les aspects cognitifs car l'environnement dans lequel nous progressons est dynamique et change à travers le temps.

Comme nous pouvons le constater, les aspects cognitifs constituent des concepts clés dans la modélisation de wayfinding, particulièrement quand l'environnement où nous progressons, à savoir le milieu maritime, dépend de sa perception et non pas exclusivement de sa structuration comme c'est majoritairement le cas en milieu urbain. Dans ce dernier, la plupart des applications sont fondées sur des approches de pathfinding car la structuration spatiale dépend essentiellement d'un réseau de transport. Nous trouvons à la marge, des travaux sur le wayfinding dans des environnements semi-structurés ([Brosset \(2008\)](#)). A contrario, l'environnement maritime n'a pas une structuration prédéfinie mais sa structure spatiale est ouverte ce qui exige du navigateur une interaction avec les concepts résultant de la perception des entités à travers le temps. La modélisation des aspects cognitifs nous donnera la possibilité de faire face et d'intégrer les concepts sémantiques dans la modélisation d'une trajectoire de navigation côtière.

Les trajectoires déduites grâce aux processus de *pathfinding* ou de *way-*

*finding* ont suscité l'intérêt de la communauté informatique en raison de leur importance et de leur intégration dans différentes applications SIG. Ceci a abouti à des modélisations différentes de trajectoires en fonction de l'environnement ou du comportement de l'agent qui parcourt l'itinéraire. De ce fait, la modélisation de trajectoires est associée à la sémantique d'évolution de l'objet dans un environnement donné. En d'autres termes, chaque comportement adopté dans l'itinéraire par un objet mobile à une sémantique liée à la contrainte de son activité ou de l'environnement spatial dans lequel il évolue. L'analyse de ce dernier est vitale pour une bonne orientation dans le processus de *wayfinding* car c'est de cet espace que proviennent les indications pour suivre le bon chemin. Il en résulte qu'il est primordial d'intégrer ces cognitives dans la modélisation des trajectoires dans un processus de *wayfinding*.

## 1.5 La sémantique dans la modélisation de trajectoire

Dans le cadre de la modélisation des trajectoires, deux domaines de recherche peuvent être distingués : le premier consiste à établir une modélisation de trajectoires afin d'analyser et interpréter les données générées par l'objet, quant au deuxième il est lié à la planification des trajectoires (c.-à-d. au routage) qui est l'objectif de nos travaux. Autrement dit, la première modélisation fait émerger une sémantique à partir des trajectoires : pourquoi ce comportement existe dans l'itinéraire ? Cette modélisation est associée à la terminologie « trajectoires sémantiques » ([Spaccapietra et al. \(2008\)](#)) car les données de localisation de l'objet mobile sont enrichies avec des informations contextuelles. A contrario, la deuxième modélisation fait émerger une trajectoire à partir d'une sémantique déduite à partir de l'environnement. Nous présentons dans ce qui suit plus explicitement la particularité de chacune de ces deux modélisations.

### 1.5.1 De la trajectoire à la sémantique

Plusieurs travaux sur les trajectoires sémantiques ont été effectués dans différents environnements (maritime, urbain, etc.) ([Yan et al. \(2011\)](#); [Zheng et al. \(2010\)](#); [Vandecasteele et al. \(2014\)](#); [Camossi et al. \(2013\)](#)). Fondés sur des analyses spatiale et temporelle, ces travaux ont pour but de prédire ou encore de détecter des anomalies dans les comportements. Ainsi, les approches suggérées se basent sur des données numériques accessibles via des moyens

de localisation tels que les GPS (Global Positioning System) et AIS (Automatic Identification System). En d'autres termes, la trajectoire est prédéfinie (succession de géo-localisations) et les approches consistent à lui donner une interprétation selon le domaine d'application choisi et par conséquent d'en déduire une sémantique en adéquation avec ce dernier. Pour ce faire, les caractéristiques de l'environnement doivent être connues afin d'identifier les points d'intérêt du navigateur, tels que les restaurants, les monuments, les musées dans le cas d'analyse des trajectoires touristiques par exemple (Parent et al. (2013)). Dans cette thématique, la trajectoire est définie à partir des segments de l'itinéraire qui jouent un rôle important et ont de l'intérêt pour une application donnée. À chaque trajectoire identifiée est assigné deux points spatio-temporels spécifiques qui désignent une position dans l'itinéraire en question. Ces deux points sont décrits par le « début » et la « fin » de la trajectoire : c'est la première et la dernière position de la trajectoire parcourue par l'objet mobile (Spaccapietra et al. (2008)). Cependant, différentes localisations du mouvement d'un objet sont notées par une unité spatiale, temporelle et une propriété telle que la direction ou la vitesse (Parent et al. (2013)). L'introduction de l'aspect temporel et le découpage des trajectoires par période et par point spatio-temporel est inspiré des travaux de Hägersstrand (1989). Chaque trajectoire brute (données GPS) est enrichie par des connaissances. Dans cette optique, les travaux de Yan et Spaccapietra (2009) visent dans un premier temps à segmenter la trajectoire et à définir les points d'arrêt (le « début » et la « fin » d'une trajectoire ou les « stop »). Une fois la structuration de la trajectoire brute établie, l'annotation vient l'enrichir pour ainsi la définir comme étant une trajectoire sémantique. Dans la Figure 1.7, nous constatons qu'une personne s'est rendue à son lieu de travail en utilisant deux moyens de transport qui sont le tramway et le bateau.

### 1.5.2 De la sémantique à la trajectoire

La modélisation de la planification de trajectoire vise dans un premier temps à modéliser la sémantique relative à l'influence de l'environnement sur l'objet et en conséquence sur la trajectoire à suivre. Cette modélisation dont l'ambition est son exploitation au sein d'un système d'information, requiert la compréhension et l'étude du raisonnement déployé pour trouver son chemin. La problématique est le plus souvent traitée à partir de l'analyse des descriptions d'itinéraires faites par des utilisateurs pour en extraire la sémantique. Ces descriptions d'itinéraires se présentent sous plusieurs formes : linguistique (écrite ou orale), graphique (schémas, croquis) ou mixte. Chacune de ces formes présente des particularités et des pouvoirs d'expression sémantique qui lui sont propres. De ce fait, elle contribue aussi

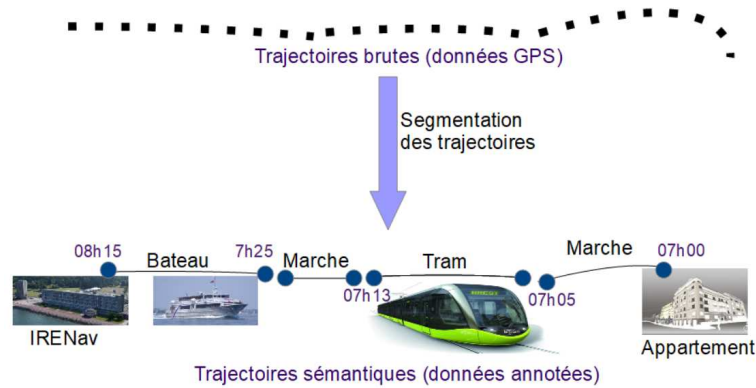


FIGURE 1.7 – De la trajectoire brute à la trajectoire sémantique

à la modélisation qualitative d’environnement naturel.

### Différentes formes de description d’itinéraire

Un itinéraire peut être retranscrit par différents moyens, l’objectif étant de décrire une expérience de navigation à une autre personne ou à des fins d’archivage. Le *mode linguistique* et le *mode graphique* sont couramment utilisés, voire associés, pour représenter l’environnement ainsi que les différents déplacements. Le *mode linguistique* est bien adapté à la description d’itinéraire dans le sens où la linéarité et la chronologie d’un itinéraire se retrouvent dans le texte et le discours. Les constructions linguistiques sont naturellement plus élaborées dans les textes que dans le langage oral. Les principales contributions concernant l’analyse des descriptions verbales de route proviennent de [Daniel \(1997\)](#), [Daniel \(1998\)](#), [Denis et al. \(1999\)](#). [Daniel \(1997\)](#) construit un cadre général fondé sur la relation action/repère pour l’analyse de description verbale de parcours et utilise ce cadre dans plusieurs expériences où les participants sont familiarisés avec l’environnement ([Daniel \(1997\)](#); [Denis et al. \(1999\)](#)). Plus précisément, les cinq classes de la catégorisation de [Daniel \(1997\)](#) sont :

- classe 1 : les actions exprimées sans repère ;
- classe 2 : les actions exprimées avec références à un repère ;
- classe 3 : les repères autres que ceux mentionnés avec une action ;

- classe 4 : description d'un repère sans mentionner sa localisation ;
- classe 5 : classe des commentaires.

D'autres études empiriques ont exploré l'utilisation du langage dans des contextes différents (Raubal and Egenhofer (1998); Timpf (2001)). L'étude de Raubal sur la recherche d'itinéraire – ou « wayfinding » – dans les aéroports contribue à une meilleure compréhension du discours spatial dans des environnements intérieurs ou « indoor ». À l'inverse, Brosset (2008) étudie les descriptions d'itinéraires en environnement naturel tout comme Egorova et al. (2015) qui analysent des descriptions textuelles dans le contexte de l'alpinisme afin d'explicitier la segmentation de l'espace et l'influence des landmarks dans ce type d'environnement. Une étude de Ishikawa and Kiyomoto (2008) compare l'effet des instructions de navigation en utilisant des cadres de référence différents (absolu et relatif). Enfin, d'autres contributions rendent compte des concepts de direction et de mouvement lors de l'analyse de descriptions verbales de choix d'itinéraires recueillies dans le cadre d'expériences in situ (Rehrl et al. (2009)), ou traitent des repères dans les instructions de directions, soit dans le cadre de description de parcours pour l'aide à la navigation (Daniel (1998)), soit comme moyen d'enrichissement pour la recherche d'itinéraire Raubal and Winter (2002).

Le *mode graphique* a le pouvoir d'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. La représentation graphique d'une dynamique de déplacement prend des formes relativement moins variées que celles des entités car elle se fait essentiellement 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. Les chorèmes<sup>4</sup> sont un outil de représentation cartographique adapté à la visualisation d'une dynamique de l'espace (Laurini et al. (2010)).

Enfin l'association des modes linguistique et graphique offre des possibilités de description et de représentation d'itinéraire intéressantes. À l'image des systèmes de navigation par GPS utilisés dans les automobiles, la combinaison du graphique et du texte pour décrire un itinéraire est courante.

---

4. Chorème est un néologisme géographique introduit par Brunet (1980). Le terme vient du mot grec « chôra », qui signifie territoire, étendue, lieu, contrée.

### 1.5.3 Modèles qualitatifs pour la description d'itinéraire

Plusieurs modèles, fondés sur des graphes, ont été proposés dans les domaines de la robotique et de l'informatique pour modéliser les processus de navigation. Une comparaison de différents modèles (Navigator, PLAN, Qualnav, TOUR, TRAVELLER) a été réalisée par [Brosset \(2008\)](#). Cette comparaison a mis en évidence la pertinence d'une modélisation fondée sur les repères, les positions et les actions. Cependant, Brosset a montré que l'absence de réseau support (que l'on trouve couramment en environnement urbain) et la richesse des informations fournies lors d'une navigation en milieu naturel ont nécessité la mise en place d'un nouveau modèle qualitatif pour la description verbale d'itinéraire en environnement naturel.

Beaucoup de ces modèles reposent sur la classification de [Daniel \(1997\)](#). La sémantique de la représentation d'itinéraire n'est alors exprimée qu'à travers les repères – catégorisés dans des taxonomies – qui qualifient les actions et les points de réorientation. Il en résulte une incapacité des modèles à pouvoir raisonner et inférer de nouvelles connaissances. Cependant, les travaux de [Yang and Worboys \(2015\)](#) permettent de générer un modèle de graphe pour la navigation en se fondant sur un modèle formel intégrant des informations géométriques et sémantiques ce qui permet d'utiliser indirectement du raisonnement par fonctions. Hormis les modèles de graphe qui sont fortement présents dans la littérature du « wayfinding », d'autres travaux ont été proposés. La Table 1.7 résume quelques-uns des travaux qui se sont consacrés à la modélisation du principe de navigation dans des environnements structurés et non structurés tout en considérant ou non différents aspects dans la modélisation tels que la prise en compte du temps ou des landmarks ainsi que la capacité de raisonnement.

Dans la Table 1.7, nous avons recensé certains travaux pouvant être classifiés selon leur prise en compte ou non de certains paramètres qui influencent le processus de « wayfinding », à savoir les landmarks, le raisonnement et l'aspect temporel. Ce dernier est considéré comme pris en compte lorsqu'il influence le raisonnement ou l'état d'un landmark et non lorsqu'il est considéré comme étant une contrainte pour celui-ci (ex : une contrainte de distance temporelle). Notons aussi que la majorité des travaux s'est concentrée sur la navigation dans des environnements structurés, ce qui fait de la modélisation formelle du processus du « wayfinding » dans le milieu maritime – c.-à-d. dans un environnement semi-structuré – un vrai challenge. Dans cette classification, les modèles à base d'ontologie sont particulièrement intéressants pour

|                                             | Paramètres |              |           | Environnement |                |
|---------------------------------------------|------------|--------------|-----------|---------------|----------------|
|                                             | Temps      | Raisonnement | Landmarks | structuré     | semi structuré |
| <b>Modèle à base de graphe</b>              |            |              |           |               |                |
| <a href="#">Raubal and Worboys (1999)</a>   |            | ✓            | ✓         | ✓             |                |
| <a href="#">Yang and Worboys (2015)</a>     |            |              | ✓         | ✓             |                |
| <a href="#">Stoffel et al. (2007)</a>       |            | ✓            |           | ✓             |                |
| <a href="#">Gaisbauer and Frank (2008b)</a> |            |              |           | ✓             |                |
| <a href="#">Goetz and Zipf (2011)</a>       |            |              |           | ✓             |                |
| <a href="#">Brosset (2008)</a>              |            |              |           |               | ✓              |
| <b>Modèle à base d'ontologie</b>            |            |              |           |               |                |
| <a href="#">Timpf (2002)</a>                | ✓          |              |           | ✓             |                |
| <a href="#">Tsatcha (2014)</a>              | ✓          |              |           |               | ✓              |
| <a href="#">Scholz and Schabus (2014)</a>   | ✓          |              | ✓         | ✓             |                |
| <a href="#">Kikiras et al. (2006)</a>       |            | ✓            | ✓         | ✓             |                |
| <b>Algorithmes/Grammaire</b>                |            |              |           |               |                |
| <a href="#">Kiefer et al. (2015)</a>        |            | ✓            | ✓         | ✓             |                |
| <a href="#">Epstein et al. (2015)</a>       |            | ✓            |           | ✓             |                |

TABLE 1.7 – Classification de différentes modélisations du processus de « way-finding ».

prendre en considération l'ensemble des dépendances du modèle. Ainsi, tous les aspects couvrant la temporalité, le raisonnement, la saillance et la spatialité peuvent y être inclus et cela quel que soit le type d'environnement. De plus, dans une modélisation ontologique, les concepts sont définis d'une manière intuitive.

## 1.6 Conclusion

Quelque soit l'environnement, déterminer un itinéraire requiert une prise de décisions : quelle direction prendre, quelles sont les contraintes à prendre en considération, etc.? Pour nous assister dans cette tâche, des systèmes informatiques proposent des systèmes de recommandations ou d'aide à la décision qui tiennent compte des contraintes spécifiques dont les plus répandues sont la distance et le temps de parcours. Dans ce contexte, nous souhaitons définir un modèle permettant de proposer une trajectoire qui est contrainte par des aspects spatio-temporels mais également par des aspects cognitifs liés à la sémantique de l'environnement. Dans cette partie, nous avons présenté la différence entre le wayfinding et le pathfinding. Le dernier exige une modélisation par graphe quant au wayfinding, différentes modélisations sont établies. Cependant, Lynch qui en est le précurseur, extrait les éléments qui reviennent le plus souvent dans la « cognitive map » des personnes qui effectue le processus de wayfinding. Certains éléments représentent indirectement les éléments d'un graphe :

- Chemin : c'est un canal potentiel ou s'effectue un mouvement.
- Bordure : elle représente un élément linéaire qui peut être considéré comme un chemin ou une rupture d'un élément continu. Par exemple, le littoral qui est un chemin pour les piétons mais aussi une rupture de l'environnement maritime.
- Région : c'est une surface dans la ville caractérisée par son identification intérieure mais pas forcément identifiable de l'extérieur.
- Nœud : c'est un spot influençant stratégiquement l'itinéraire. Généralement, c'est une jonction ou une concentration de saillances remarquables par un observateur.
- Landmark : c'est aussi un spot mais à l'inverse d'un nœud, il est plutôt un élément externe à l'itinéraire et non forcément accessible.

A partir de ces dernières définitions, nous constatons la présence d'une terminologie : chemin, bordure et nœud. Ces trois facteurs représentent indirectement les arcs ou les arêtes d'un graphe (chemin et bordure) ainsi

que les sommets (nœud). Dans un environnement urbain, faire cette correspondance est un processus intuitif. Dans le cas de l'environnement maritime, l'espace est ouvert et l'orientation est caractérisée par les landmarks. De ce fait, dans ce cadre de navigation maritime côtière, il est nécessaire de définir les éléments de wayfinding et d'y inclure les éléments de pathfinding afin de générer une trajectoire. Autrement dit afin de définir notre propre modèle il est important de retrouver une correspondance avec les éléments extraits par Lynch.

Par ailleurs, la modélisation de trajectoires doit réunir le maximum d'éléments impliquant les facteurs clés de wayfinding que nous avons détaillés dans la partie 1.3. Les fondements spatio-temporels et cognitifs (saillance, affordance) impliqués dans ce processus doivent y être modélisés, ce qui sous-entend que la sémantique des objets composant l'environnement maritime côtiers doit également être prise en compte.

Dans ce contexte de modélisation, nous avons présenté (cf. partie 1.5) différentes modélisations prenant en compte (ou non) les principes de raisonnement, de landmark et de temporalité. Ci-après, nous avons fait le choix de retenir une modélisation ontologique qui offre différents degrés d'expressivité permettant de définir les principes fondamentaux de wayfinding ainsi que des mécanismes de raisonnement permettant d'inférer de nouvelles connaissances, c.-à-d. des trajectoires de navigation maritime côtière, aptes à être intégrées dans un système d'information dédié à la navigation.



# Chapitre 2

## Modélisation ontologique

”L’université coupe en deux  
d’un côté les scientifiques et de  
l’autre côté les littéraires. Ce  
qui fait d’un côté les instruits  
incultes et de l’autre côté les  
cultivés ignorants ; c’est-à-dire  
deux populations d’imbéciles”

---

Michel Serres

### 2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons conclu par une comparaison entre différentes modélisations. Les approches comparées sont catégorisées selon plusieurs facteurs et la modélisation ontologique nous permet leur intégration. De plus, parmi les objectifs de nos travaux, nous avons cité l’intégration de la sémantique qui est fondamentale à la modélisation de la navigation maritime côtière. Ceci appuie fortement notre choix pour un modèle fondé sur une ontologie qui pourra être intégré dans un système d’aide à la navigation. Selon [Guarino \(1998\)](#), l’utilisation des ontologies peut intervenir dans l’analyse des besoins des systèmes et de leur maintenance permettant ainsi l’inspection d’une incohérence. Les ontologies opèrent également dans la coopération et les échanges d’information au même format avec une interopérabilité entre les données hétérogènes. Dans les ontologies, le vocabulaire et la structuration des métadonnées permettent de simplifier la recherche d’information et d’exprimer des requêtes en langage naturelle. Ce chapitre présente la formalisation d’une trajectoire maritime côtière (cf. partie [2.4](#))

ainsi que son modèle ontologique (cf. partie 2.5). De ce fait, nous avons scindé cette partie en décrivant comment nous sommes passés des descriptions de la navigation maritime à sa modélisation. Nous introduirons les notions de base d’une ontologie ainsi que son formalisme dans la partie 2.2. Nous évoquerons également les principales notions relatives à la navigation maritime côtière dans la partie 2.3.

## 2.2 Ontologie

### 2.2.1 De la philosophie à l’intelligence artificielle

Le Dictionnaire Anglais d’Oxford enregistre la première occurrence du terme « ontology » en 1721 dans le dictionnaire de Bailey. L’ontologie est un domaine qui fait partie de la branche de la philosophie. Les philosophes lui associent souvent le domaine de la métaphysique car elle décrit la science des types de structures des objets, des propriétés, des événements ou des relations dans le monde réelle.

Par ailleurs en philosophie, l’ontologie donne lieu à une classification qui devrait être définitive pour répondre aux questions liées à l’univers : de quelles classes avons-nous besoin pour une description et une explication complète de ce qui se passe dans l’univers ? De quelles entités avons-nous besoin pour rendre vrai toutes les vérités ? Les travaux de Quine (1953) encouragent la classification des objets dans l’univers en les reliant aux sciences naturelles où chaque science a sa catégorisation des entités. Ce qui donne un réseau d’ontologies partielles avec une formalisation canonique mise au point par la logique du premier ordre (FOL : First-Order Logic) et pour embellir l’ontologie Quine introduit la sémantique dans les déclarations des théories. Toujours dans un contexte philosophique, les spécialistes dans la branche des ontologies ont recours à des méthodes formelles pour prouver leurs théories. Pour ce faire, des formalisations dérivant de l’algèbre, la méréologie, la théorie des ensembles, etc. sont adoptées, ce qui permet par la suite d’exprimer intuitivement des définitions formelles et sémantiques donnant ainsi la possibilité aux philosophes de vérifier la consistance de leurs théories.

Suivant le processus d’évolution des ontologies, la formalisation avec des méthodes logiques a fait émerger les ontologies dans le domaine de l’intelligence artificielle. En effet, dans le domaine de l’ingénierie des connaissances, l’ontologie est empruntée à la philosophie et est apparue dans le domaine informatique pour modéliser les connaissances et faire de cette modélisation une base de connaissances. Neches et al. (1991) définissent les ontologies

comme étant « les termes et les relations qui composent un vocabulaire d’une thématique, mais aussi les règles qui combinent des termes et des relations afin d’enrichir le vocabulaire ». Quant à [Guarino and Giarretta \(1995\)](#), ils décrivent l’ontologie comme « une conceptualisation partagée et unifiée qui peut être partielle ». Cette dernière définition rejoint indirectement le concept philosophique de l’ontologie. En considérant les deux descriptions d’une ontologie, nous constatons qu’une ontologie constitue une partie où les termes de base d’une thématique donnée doivent être distingués ainsi que les relations les reliant. Aussi, l’introduction des règles met en évidence l’aspect formel qui décrit une ontologie. La conceptualisation partagée consolide l’idée philosophique que plusieurs ontologies partielles peuvent être modélisées puis partagées pour former une ontologie globale où un éventuel enrichissement est effectué. Pour résumer, afin de constituer une ontologie, trois étapes sont à suivre :

- Conceptualisation : décrit l’abstraction du domaine en choisissant le vocabulaire des objets et des relations approprié au domaine étudié.
- Formalisation : désigne la description formelle des concepts définis dans la conceptualisation. Ceci permet la vérification de la cohérence et la consistance de la théorie. Cette formalisation se fait avec ce que l’on appelle des axiomes.
- Modélisation ontologique : l’enrichissement du vocabulaire et l’ajout des règles combinant les objets créera une base de connaissances qui formera l’ontologie et qui pourra être partagée.

La formalisation et les règles déterminées caractérisent la modélisation théorique d’une sémantique formelle dont les langages utilisés dans ce but sont fondés sur des méthodes logiques. Les langages logiques sont réputés pour leur forte expressivité. Ainsi, la formalisation devient intuitive et explicite. Ceci conduit au mécanisme de raisonnement qui permet d’évaluer la consistance de la théorie avec les technologies du web sémantique.

Étant donné que notre approche est fondée sur une approche caractérisée par la modélisation ontologique, nous devons donc passer par ces étapes que nous avons enrichies pour les besoins de la navigation maritime côtière (descriptions textuelles et graphiques) comme illustré dans la Figure [2.1](#). Dans la suite de ce chapitre, nous détaillerons ces étapes dans le contexte de nos travaux.

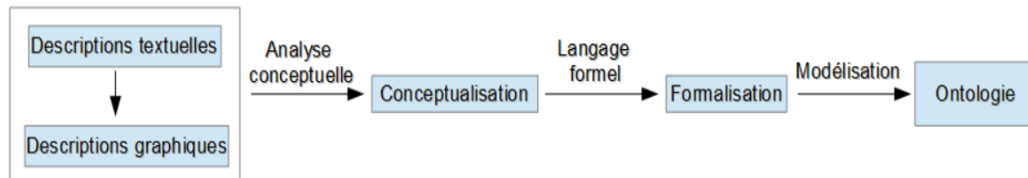


FIGURE 2.1 – Les étapes d’une modélisation ontologique

### 2.2.2 Les composants dans une ontologie

Une base de connaissances modélisée avec une ontologie intercepte la sémantique des informations d’un domaine donné. Ces informations sont décrites avec des concepts et des relations qui forment une taxonomie. Plus précisément, une base de connaissances ontologique se compose de quatre principaux éléments, à savoir : les concepts, les relations, les axiomes et les instances.

- Concepts terminologiques : décrivent des classes ou des objets appartenant à une thématique suivant le domaine d’application. Ces entités suivent une hiérarchie pouvant être simple ou complexes selon le degré de généralisation, d’abstraction ou de spécification. De plus, chaque concept suit une description primitive, c’est-à-dire une simple définition (concept atomique), ou bien une description complexe (concept complexe) qui, en d’autres termes, signifie qu’un concept est défini à partir d’autres concepts.
- Rôles : définissant les liens existants entre les objets ou les concepts. Ces relations peuvent également constituer une taxonomie ou une hiérarchie suivant le niveau de l’abstraction sémantique à décrire.
- Axiomes : désignent des définitions ou des règles pour décrire une sémantique avec un langage logique. Ces axiomes peuvent être complexes ou simples et ce suivant la combinaison des concepts et des relations entrant dans la définition. Ainsi ces axiomes forment la complexité des concepts. Par ailleurs, les règles définies introduisent les inférences.
- Assertions : les concepts définis sont instanciés avec les individus du domaine auquel nous portons un intérêt. En d’autres termes, un individu ou une instance appartient à un type de classe ou de concept dans l’ontologie. Ainsi l’ontologie est instanciée et constitue avec ce peuplement une base de connaissance consistante si la formalisation est cohérente. Cette cohérence est vérifiée grâce aux définitions établies notamment les axiomes et la hiérarchie définis.

Dans nos travaux, nous définissons tous les éléments pour constituer la base de connaissances relative à la navigation maritime côtière en incluant la sémantique qui est associée au wayfinding dans cet environnement.

### 2.2.3 Les types d'ontologies

En considérant le niveau d'abstraction d'une modélisation, nous distinguons trois type d'ontologies :

- **Les ontologies globales** : Elles constituent une représentation au plus haut niveau. Autrement dit, ce type d'ontologie décrit des concepts à un niveau d'abstraction très générique. Elles servent une large communauté car elle décrivent des entités, présentes dans différents modèles, telles que la notion d'objet, de propriété, de valeur, etc. Elles sont dédiées à une utilisation générale.
- **Les ontologies du domaine** : Elles sont établies pour des tâches bien précises. Les domaines d'utilisation de ces ontologies (biologie, écologie, chimie etc.) sont donc contrains par une terminologie et des définitions propres à eux. Ce type d'ontologie est réutilisable dans le même domaine, si la modélisation des relations et des concepts est établie le plus globalement possible dans le domaine visé.
- **Les ontologies d'application** : Leur abstraction est très spécifique. La terminologie avec laquelle elles sont définies est bien précise et ne peuvent donc servir que dans une application relative à cette terminologie. Ce type d'ontologie peut être défini par une ontologie du domaine.

## 2.3 De la description à la conceptualisation

Dans l'optique de planifier une trajectoire 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. Ces derniers peuvent en effet être exploités pour que le bateau puisse suivre un chemin sécurisé permettant d'arriver à sa destination. Afin d'explicitier les notions adoptées dans une navigation, nous nous sommes fondés sur des exemples de descriptions



Celui-ci est à  $254^\circ$  dans la *Description 1* et à  $191^\circ$  dans la *Description 2*. Le bateau doit donc suivre ce cap durant une période de temps correspondant à la durée de traversée sur cette route.

**Way Point** : représente un points clés de la trajectoire, il peut décrire : un **point de départ**, un **point d'arrivée** ou un **point de décision**. Ce point de décision marque le **point** où le navigateur décide de changer de **cap** et donc le changement de route. C'est notamment à partir de ce point que la visibilité et la perception des **repères** de l'environnement (**amers**) jouent un rôle important.

**Un Amer (Navigation-Mark)** : représente **un point** de repère et d'orientation pour fixer **un cap** et définir ainsi une **route**. Le repère a certaines propriétés dues à sa **saillance visuelle** qui peut le distinguer des autres éléments de l'environnement, comme par exemple, les phares, les balises, les roches, etc. Dans les descriptions précédentes, ces amers correspondent au « *phare du Petit Minou* » ou 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 entre cet amer et la direction du Nord géographique à partir du bateau. Dans la *Description 1*, la **route** suit un **relèvement** à  $254^\circ$  sur le phare du Petit Minou.

**Un alignement (LeadingLine)** : comme son nom l'indique, ce concept aligne au moins deux amers, ce qui représente une **ligne** qui forme un angle avec le nord. Dans la *Description 2*, la **route** suit un **alignement** de  $191^\circ$  formé par le phare du Petit Minou et le rocher en forme de chaise de la pointe du Toulinguet.

L'application de ces concepts requiert un raisonnement de la part du navigateur. En effet, l'environnement est défini par différents aspects comme son organisation spatiale, ce qui introduit des contraintes et influence l'itinéraire de navigation. De ce fait, une trajectoire aura des dépendances liées aux entités qui l'entourent.

## 2.4 De la conceptualisation à la formalisation

### 2.4.1 Préliminaires et motivation

La représentation des connaissances, notamment la sémantique, s'appuie sur des formalismes qui permettent de représenter un domaine donné dans l'univers mais également de raisonner sur ces connaissances afin d'avoir un système fondé sur l'intelligence artificielle. Par conséquent, ce système aura la capacité d'inférer des informations suivant la formalisation que nous lui auront adapté.

Les approches de formalisation sont catégorisées selon l'utilisation ou non de la logique. Les formalismes logiques sont fondés sur la logique des prédicats qui est un langage non ambiguë et intuitif. Les formalismes non-logiques sont eux fondés sur des structures de réseau ou des représentations basées sur des règles issues des expériences cognitives en rapport avec des tâches exécutées par l'homme ([Baader et al. \(2003\)](#)). Dans ce dernier type d'approches, nous citons les réseaux sémantiques qui ont été introduits suite aux travaux de [Quillian \(1968\)](#) où l'aspect de mémorisation est étudié. Ces réseaux sont adoptés pour encoder le « sens » des mots, ce qui reflète une structure sémantique. Dans ce cas, la structure est représentée par des nœuds qui décrivent les assertions et le sens des mots est décrit par des arcs, pour associer les informations et formant ainsi des propriétés. En dépit de l'utilisation pratique de ces structures sous forme de graphe, [Baader et al. \(2003\)](#) expliquent leurs lacunes dans l'expression de la précision sémantique. Les recherches se sont alors tournées vers la logique du premier ordre et permettent la représentation hiérarchique des connaissances. Ceci induit à une description intuitive mais aussi à un mécanisme de raisonnement plus efficace. Cependant, plus les connaissances sont importantes en termes de volume plus les inférences deviennent complexes. D'après [Baader et al. \(2003\)](#), c'est à partir de là que la logique de description a commencé à émerger sous le nom de systèmes terminologiques. Ces derniers soulignent le fait que le langage utilisé permet de déterminer la terminologie d'un domaine donné. Enrichie, cette terminologie forme des concepts qui font que la représentation soit bâtie sur un langage conceptuel qui deviendra plus tard –avec des développements avancés– le langage formel appelé logique de description (DL).

Comme expliqué précédemment, nos travaux s'inscrivent dans le cadre de la modélisation formelle de trajectoires de navigation maritime dont les paramètres dépendent d'une navigation par repères (amers). Pour ce faire,

nous avons opté pour une formalisation fondée sur DL. Celle-ci est définie par Baader et al. (2003) comme un langage formel pour la représentation de connaissances et est considérée comme le noyau du système de représentation de connaissances. D'une part pour la représentation structurelle qu'elle peut fournir et d'autre part, parce qu'elle permet d'avoir une description conceptuelle des connaissances d'un domaine d'application qui est dans notre cas la navigation maritime côtière. Ce choix va nous permettre d'ajouter de la sémantique dans les traitements de nos informations. En effet, la logique de description donne la possibilité de détailler les connaissances avec des expressions constituées de concepts sous forme de prédicats unaires et de rôles qui décrivent les relations existantes entre ces concepts. En d'autres termes, ces expressions sont considérées comme des fragments de la logique du premier ordre. Par ailleurs, tous les systèmes fondés sur DL offre un service de raisonnement sur les prédicats définis Baader et al. (2003). Comme nous allons le constater dans notre propre formalisation, l'expressivité augmente avec le nombre de constructeurs utilisés. En revanche, le raisonnement devient plus difficile. Dans nos travaux, nous optons pour une application ontologique qui permettra d'interpréter nos expressions sémantiques avec le langage d'ontologique OWL car ce dernier est basé sur DL. De plus, nous ajoutons des règles à notre système afin d'enrichir le raisonnement sur les instances de notre base de connaissances. Ces règles sont formalisées en SWRL (langage de règles pour le web sémantique)

Le langage de description suit une syntaxe spécifique à la théorie des modèles formelles. Il comprend un alphabet pour la nomination des prédicats ainsi que pour leur instanciation (assertion). L'expressivité est également alimentée par les constructeurs logiques :  $\forall$ ,  $\exists$ ,  $\neg$ ,  $\sqcup$ ,  $\sqcap$ ,  $\sqsubseteq$  et  $\equiv$ . La base de connaissances construite à ce fait est constituée de deux parties importantes : la *TBox* et la *ABox*.

- **La TBox** (pour Terminological Box) définit l'ensemble des **concepts atomiques** et des **rôle** qui représentent le vocabulaire des connaissances. Elle comporte également des **concepts complexes** sous forme  $C \sqsubseteq D$  (signifiant que l'ensemble interprété par le concept C est un sous-ensemble des interprétations du concept D) ou sous forme  $C \equiv D$  (signifiant que l'ensemble interprété par le concept C est aussi interprété par le concept D). De plus, la *TBox* peut englober des concepts formalisé par une combinaison de rôles et de concepts. Ce dernier type de concept est défini parce que l'on appelle axiome.
- **La ABox** (pour Assertionnal Box) décrit les assertions effectuées dans la base de connaissances. Ces assertions implique la définition

du type d'un individu (instance). Autrement dit, par le biais de cette assertion, nous définissons l'appartenance d'une instance à un concept. La *ABox* comporte également l'assertion des rôles entre les individus. En d'autres termes, cette assertion spécifie si une relation existe entre deux individus.

La notion d'interprétation dans une base de connaissances peut s'appliquer sur les concepts ou sur les rôles. L'interprétation d'un concept  $C(x)$  désigne le fait qu'il existe un individu, dans le domaine d'interprétation,  $x = a$  de type  $C$ . L'interprétation d'un rôle  $R(x,y)$  stipule qu'il existe deux individus, dans le domaine d'interprétation,  $x = a$  et  $x = b$  sont liés par le rôle  $R$  dans les assertions de rôles. Pour résumer, une interprétation est un sous-modèle qui satisfait un fait dans la base de connaissances (plus de détails dans [Baader et al. \(2003\)](#)).

Pour réaliser la modélisation du contexte de la navigation maritime, il faut initialement passer par l'étape d'identification des concepts qui constitue la *TBox*.

## 2.4.2 Vers la formalisation des concepts

La formalisation proposée nous a incités à passer d'abord par la conceptualisation des notions de « wayfinding » dans le contexte de navigation maritime côtière. Cette première étape, détaillée dans la partie 2.3, nous a permis d'identifier les entités et les dépendances existantes entre elles afin de faciliter la modélisation qui fera l'objet d'une prochaine étape (cf. partie 2.5). Dans la formalisation, nous déterminons l'émergence des différentes relations (dépendances) existantes entre les concepts qui sont identifiées suite à l'analyse textuelle et graphique de préparation de trajectoires dont un exemple est présenté dans la Figure 2.2. A partir de là, la formalisation est établie entre les concepts en considérant la dimension spatiale et la notion sémantique de visibilité. Ceci donnera la possibilité d'avoir une modélisation formelle qualitative qui favorisera le mécanisme de raisonnement.

### 2.4.2.1 Analyse graphique fonctionnelle pour la formalisation

Nous détaillons ici, l'analyse des descriptions graphiques des notions de la navigation illustrées par l'itinéraire de la Figure 2.3. A partir de cette dernière, nous constatons la subdivision de la trajectoire en plusieurs segments appelés routes ([DeparturePoint,DecisionPoint], [DecisionPoint,DecisionPoint], [DecisionPoint,DestinationPoint]). Ces dernières sont influencées par l'alignement ou le relèvement sur des amers. Les

influences de l'environnement sur la trajectoire peuvent être considérées comme des relations que nous notons avec un prédicat binaire. A titre d'exemple, *une route doit être sur un relèvement ou sur un alignement* ce qui peut se traduire par le prédicat *sur(route,alignement)*. Dans le contexte de la formalisation spatiale, différents travaux ont été menés pour formaliser les relations spatiales à l'aide de prédicats binaires. Ces prédicats jouent un rôle important dans nos travaux car les routes composant la trajectoire engendrent des relations spatiales avec plusieurs objets qui définissent l'environnement. Les travaux sur lesquels nous fondons notre formalisation des relations spatiales topologiques sont les 9-intersections de [Egenhofer and Herring \(1991\)](#) et RCC8 de [Randell et al. \(1992\)](#) car elles interprètent au mieux les relations spatiales existantes entre les concepts. Dans la perspective de standardiser les données géospatiales, l'OGC (Open Geospatial Consortium) a défini une représentation de l'entité spatiale en DL incluant de ce fait des concepts et des rôles qui satisfont notre niveau d'abstraction dans la formalisation. En d'autres termes, les entités composant l'environnement peuvent être décrites comme étant des objets géographiques ayant un certain nombre d'attributs. A titre d'exemple, un phare a comme attributs sa localisation, son nom ou encore sa forme géométrique qui peut être considérée comme un point. Par ailleurs, cette dernière caractéristique géométrique est très utile dans notre formalisation. En effet, en analysant le graphique de la Figure 2.3, nous notons que la trajectoire est un ensemble de lignes et que chacune d'elles représente une route. Aussi, les trajectoires doivent être sur un alignement ou un relèvement. Il en résulte qu'une relation est nécessairement établie entre des formes géométriques. En conséquence, nous pouvons dire que les concepts et les rôles liés aux données géospatiales peuvent également être associés à la formalisation d'une trajectoire maritime.

Faisant partie de l'environnement, un repère est également considéré comme un objet spatial. D'un point de vue géométrique, il est caractérisé par un point. Dans nos travaux, les repères entrent dans la définition des notions d'alignement et de relèvement. Cependant, ces notions sont spécifiées par rapport à un référentiel absolu dont le Nord géographique est l'origine. De ce fait, les relations d'orientation font également l'objet de notre formalisation. Plus explicitement, l'orientation est relative à la position des entités dans l'espace. En effet, l'alignement de deux amers qui sont fixes représente une ligne fixe (2.4a) dont l'orientation est allocentrique absolue par rapport au Nord géographique. En revanche, le relèvement d'un point de référence dans l'espace forme, comme nous pouvons le voir dans la Figure 2.4b, un angle mesuré avec le Nord géographique dont l'origine est le bateau. Nous devons donc formuler cette orientation en se basant sur le modèle d'orientation

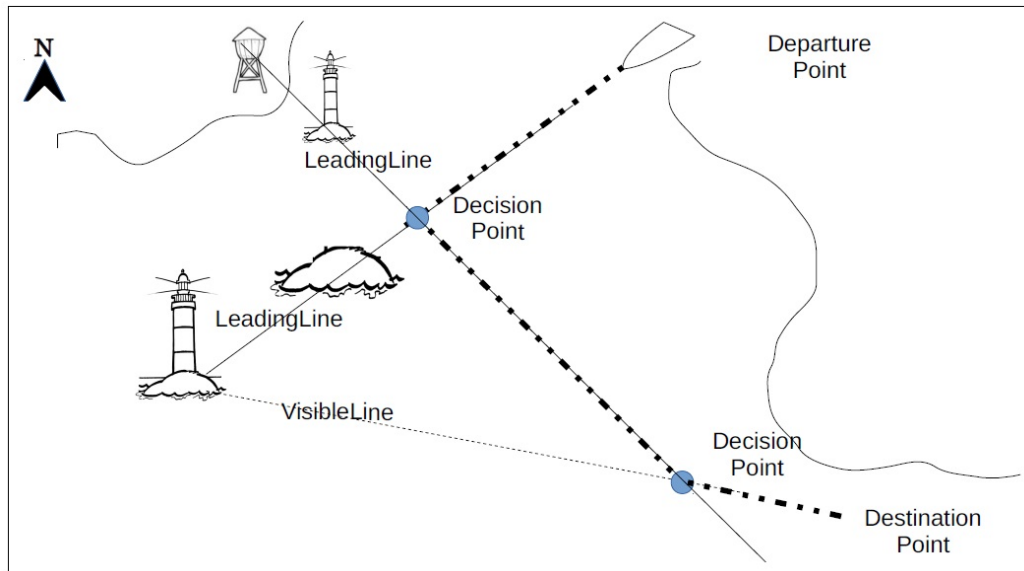


FIGURE 2.3 – Graphique illustrant le concept de trajectoire

égocentrique absolue car la relation de localisation pour le relèvement est ternaire (ex : Angle-Relèvement(Bateau,Nord,Phare)) ce qui complique sa formalisation en DL. Nous devons alors tenir compte de l'angle entre la droite (bateau/**point d'origine**, amer/objet de référence) et l'axe associé au Nord géographique.

Ces primitives d'orientation peuvent être représentées avec les concepts définis par l'OGC puisqu'en regardant l'aspect géométrique, le relèvement est un angle formé par deux lignes ; l'une d'elles est formée entre le bateau et le repère, l'autre entre le bateau et le Nord. Celui-ci peut être représenté par deux relations binaires qui peuvent facilement être traduites en DL. Néanmoins, la première ligne ne peut pas être formalisée en négligeant la condition de visibilité du repère (le point de référence pour l'orientation) sans quoi dans cette abstraction, tout objet dans l'espace de navigation pourrait avoir un relèvement avec le bateau. Or dans le monde réel, effectuer un relèvement sur un amer suppose de pouvoir le visualiser. Dès lors, l'intégration de la notion de visibilité entre le bateau et le repère est nécessaire. Autrement dit, la ligne entre la bateau et le repère sera traduite par une ligne de visibilité (**VisibleLine** dans la Figure 2.3). Aussi, cette dernière est conditionnée par des contraintes dynamiques liées au monde réel qu'il faut également intégrer. La ligne de visibilité définie dans ce contexte de navigation maritime, dépend du relief, de la visibilité associée à

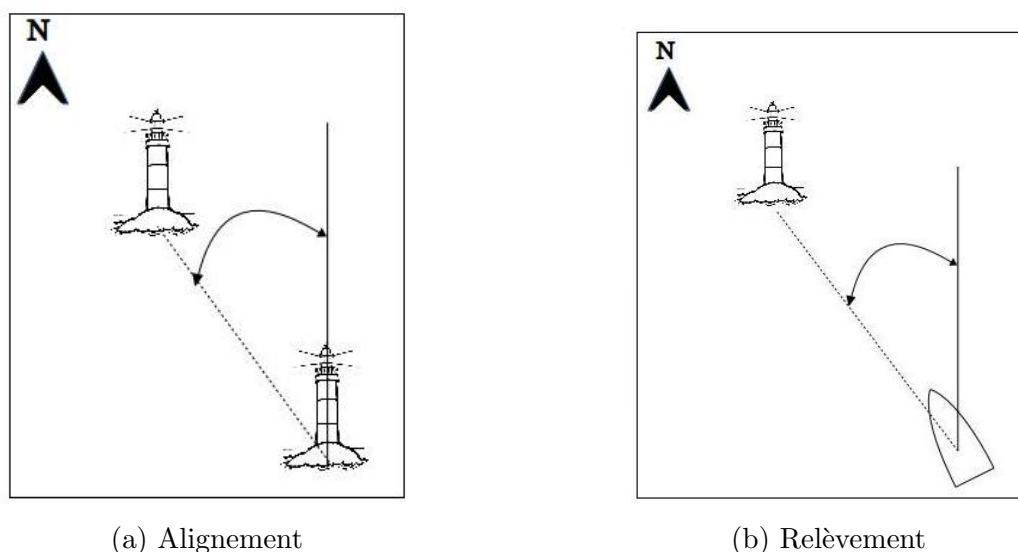


FIGURE 2.4 – Graphiques illustrant les concepts d’alignement (a) et de relèvement (b).

l’horizon, donc la prise en compte de la rotondité de la terre, des conditions météorologiques (bonne ou mauvaise visibilité) et des différents moments dans une journée (visualisation de jour ou de nuit). Pour résumer, la ligne de visibilité existe si l’amer est perçu à partir du bateau. En se basant sur les concepts de la formalisation géospatiale de l’OGC, nous avons la possibilité de formaliser cette condition. Une zone de visibilité pourrait être représentée par un cercle dont l’origine est l’objet perçu et dont le rayon est désigné par les distances de visibilité  $D_h$ ,  $D_n$  et  $D_m$  qui dénotent respectivement la distance horizon, la distance de visualisation de nuit (en rapport avec l’intensité du feu de l’amer) et la distance de visualisation relative aux conditions météorologiques (Figure 2.5). Cette dernière désigne la distance à laquelle nous distinguons clairement un objet. Elle est mise à jour par les bulletins de météorologiques et peut, par exemple, être perturbée par des phénomènes physiques tels que le brouillard (cf. Chapitre 3 pour plus de détails).

Suivant les concepts de navigation et de ligne de visibilité, nous nous apercevons que la ligne de visibilité est associée à la route à prendre car cette dernière doit couvrir un relèvement (ou un alignement) (Figure 2.3). Par conséquent, un réseau de routes maritimes est établi en définissant les nœuds de ce réseau comme des **points de décision**. Ces derniers représentent le changement de route –et donc de ligne de visibilité que le bateau doit

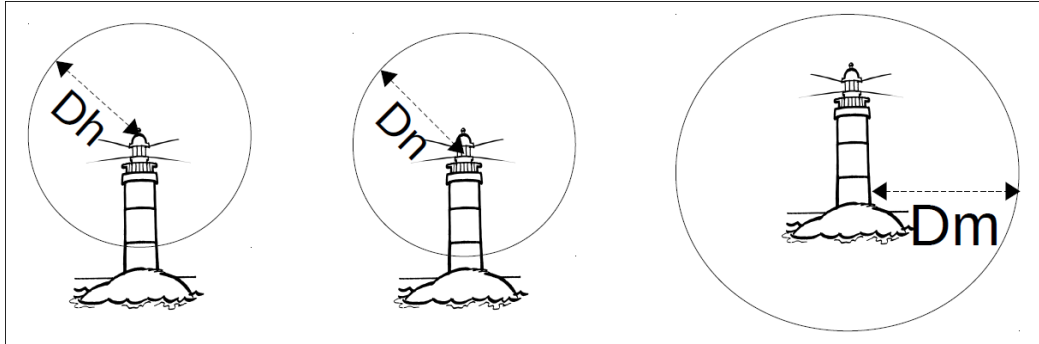


FIGURE 2.5 – Notions géométriques associées à la visualisation d'un amer

suivre—. Nous notons aussi qu'un point de décision est un point en commun entre deux lignes de visibilité représentant le point où le navigateur prend la décision de changer de cap pour suivre un nouveau cap sur une autre ligne. Afin de formaliser ce point, nous utilisons également les concepts géométriques de l'OGC ainsi que les relations qui les lient à d'autres objets dont notamment les relations topologiques des 9-intersections qui sont utiles pour l'intersection et la superposition d'objets. la formalisation de ce **point de décision** sera introduite plus loin (cf. Chapitre 4) dans le rapport afin de mieux comprendre l'intérêt de sa définition via une règle qui permettra de le déduire.

#### 2.4.2.2 Formalisation des concepts en DL

Après cette analyse graphique, nous introduisons ci-dessous les concepts relatifs à notre formalisation ainsi que les relations qui leur sont associées avec les explications adéquates. La forte interaction entre les paramètres de la trajectoire rend les définitions de certains concepts imbriquées. Les concepts atomiques utiles au reste de la formalisation sont tout d'abord définis dans la Table 2.1.

| Concepts                                                                                                               | Sémantique dans la trajectoire maritime                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $NavigationMark \sqsubseteq Point$                                                                                     | NavigationMark représente un amer et est représenté par un point dans l'espace grâce aux coordonnées géographiques (latitude, longitude).<br><i>OGC :Point</i>                                                                                                  |
| $Horizon \sqsubseteq Circle$<br>$VisibilityLightDistance \sqsubseteq Circle$<br>$VisibilityWeather \sqsubseteq Circle$ | Considéré comme zone de visibilité d'un objet dans l'espace (respectivement : visibilité à l'horizon, visibilité du feu d'un amer, visibilité selon les conditions météorologiques), chacun de ces concepts est représenté par un cercle.<br><i>OGC :Circle</i> |
| $OriginPoint \sqsubseteq Point$                                                                                        | Suivant la terminologie des relations d'orientation, ce concept représente le point à partir duquel l'observation est effectuée.<br><i>OGC :Point</i>                                                                                                           |
| $DeparturePoint \sqsubseteq$<br>$OriginPoint$                                                                          | Point de départ de la trajectoire.<br><br><i>OGC :Point</i>                                                                                                                                                                                                     |
| $DestinationPoint \sqsubseteq$<br>$OriginPoint$                                                                        | Point d'arrivée de l'objet mobile associé à la fin de la trajectoire.<br><i>OGC :Point</i>                                                                                                                                                                      |

TABLE 2.1 – Concepts atomiques

**Définition 1 :**

$VisibleLine \equiv Line \sqcap \exists \text{ contains.OriginPoint } \sqcap \exists \text{ contains.(NavigationMark } \sqcap \exists \text{ visibleFrom.OriginPoint) } \sqcap \exists \text{ hasBAngle.Angle}$

Une ligne de visibilité est une ligne (*OGC :GMLine*) reliant un point d'origine (*OriginPoint*) –étant la position du bateau– et un

amer (*NavigationMark*). Cette association avec les deux points est caractérisée par la relation topologique *contains*. De plus, l'amer doit être visible à partir du bateau (c.-à-d., depuis le point d'origine) d'où l'ajout de la relation *visibleFrom*. La relation *hasBAngle.Angle* contribue à la formalisation de l'orientation de l'amer par rapport à la position du bateau (orientation égocentrique absolue).

**Définition 2 :**

$LeadingLine \sqsubseteq Line \sqcap \geq 2 \text{ contains } NavigationMark$

La logique de description offre la possibilité de restreindre le nombre d'individus qui est en relation avec un concept ce qui représente un avantage dans la définition du concept d'alignement (*LeadingLine*). Ce dernier est donc caractérisé par une ligne (*OGC :GMLine*) formée (*contains* : relation topologique) par au minimum deux amers ( $\geq 2$ ).

**Définition 3 :**

$Bearing \equiv Line \sqcap \exists \text{ equals.}(VisibleLine \sqcap = 1 \text{ contains } NavigationMarks)$

Un relèvement (*Bearing*) est une ligne formée entre le bateau et un amer. En réalité, un relèvement couvre (*equals* : relation topologique) la ligne de visibilité qui est également une ligne (*Définition 1*) mais sans être un alignement ( $\leq 2 \text{ contains } NavigationMarks$ ).

**Définition 4 :**

$Route \equiv Line \sqcap \geq 2 \text{ contains } WayPoint \sqcap \exists \text{ within.}(Bearing \sqcup LeadingLine)$

La route est un segment limité par deux *WayPoint* (cf. Définition 7). En effet, une route est formée soit par un point de départ et un point de décision soit par deux points de décision ou bien par un point de décision et un point d'arrivée ou un point d'arrivée et un point de départ. Comme dans la *Définition 2*, nous faisons appel à la restriction numérique ( $\geq 2 \text{ contains } WayPoint$ ). La droite supportant la route doit également être sur un relèvement ou sur un alignement (*within* : relation topologique).

**Définition 5 :**  $Trajectory \equiv LineString \sqcap (\exists \text{ contains } DeparturePoint \sqcap \exists \text{ contains } DestinationPoint) \sqcap (\geq 1 \text{ contains } Route)$

L'OGC définit une *LineString* (*OGC :GMLineString*) comme étant une courbe polygonale avec un point de départ et un point d'arrivée (*contains.DeparturePoint*  $\sqcap$  *contains.DestinationPoint*). Elle peut être composée d'un ou de plusieurs segments de droite. Cette description se rapproche de la description d'une trajectoire. En effet, cette dernière est composée d'une ou de plusieurs routes qui sont représentées avec une ligne. Une trajectoire est donc composée d'au moins une route ( $\geq 1$  *contains.(GMLine*  $\sqcap$  *Road)*).

**Définition 6 :**

*DecisionPoint*  $\equiv$  *Point*  $\sqcap \exists$  *within.*((*VisibleLine*  $\sqcap$  *LeadingLine*)  $\sqcup$  (*LeadingLine*  $\sqcap$  *LeadingLine*)  $\sqcup$  (*VisibleLine*  $\sqcap$  *VisibleLine*))

Un point de décision est un point sur lequel se fait un changement de cap. Ce point assure la continuité de deux routes en marquant la fin d'une route et le début de celle qui lui succède. Étant donné que cette dernière doit être sur un relèvement qui couvre une ligne de visibilité ou un alignement alors le point de décision doit être dans (*within* : relation topologique) une ligne de visibilité et dans un alignement (*within* remplace ici le résultat de l'intersection entre deux lignes) ou bien dans un ligne de visibilité et une autre ligne de visibilité ou encore dans deux alignements.

**Définition 7 :**

*WayPoint*  $\equiv$  *Point*  $\sqcap$  (*DeparturePoint*  $\sqcup$  *DecisionPoint*  $\sqcup$  *DestinationPoint*)

Le point de départ, le point de décision (changement de cap) et le point d'arrivée représentent géométriquement les points relatifs à la trajectoire de navigation. Ils sont définis par le concept atomique *WayPoint* *OGC :Point*

Cette formalisation en DL nous permet d'intégrer la modélisation formelle dans les systèmes d'information géographiques et ce grâce à OWL (Web Ontology Language) qui est un langage qui s'appuie sur la logique computationnelle. De ce fait, nous avons opté pour les technologies du web sémantique pour aboutir à une modélisation ontologique. Nous introduisons dans ce qui suit notre modélisation ontologique qui prend en compte les définitions formelles proposées ci-dessus.

## 2.5 Modélisation ontologique de la trajectoire

Notre approche est fondée essentiellement sur une modélisation sémantique et plus particulièrement une modélisation avec des langages ontologiques. Dans la perspective de décrire au mieux le modèle sur lequel s'appuient les travaux, nous présentons dans un premier temps succinctement les technologies du web sémantique qui visent à créer les ontologies et donc à modéliser les connaissances. Ces connaissances sont structurées et décrites avec des langages standardisés par le W3C.

### 2.5.1 Les technologies du web sémantique

Initialement, le web a été considéré comme un espace pour accueillir des informations dont le contenu est consulté par des êtres humains et indirectement des moyens de communication. Toutefois, l'idée de la conception du web devait également inclure les machines dans la participation à cette communication et ainsi apporter de l'aide à l'être humain. Cependant, la conception de base ne donnait pas la possibilité de partager les connaissances, ce qui freine leur manipulation par des programmes informatiques. En d'autres termes, l'absence d'une représentation de la sémantique est un obstacle non négligeable dans le traitement automatique des données web.

Tim Berners-Lee soulève ce problème et fait émerger la terminologie du « web sémantique ». Ce dernier désigne le traitement et la communication des connaissances ou des ressources entre les humains et/ou les machines ([Berners-Lee \(1998\)](#)). Ceci marque l'évolution du monde du web d'un espace d'information réservé à l'échange entre humains à un espace plus vaste où l'intelligence artificielle est prise en compte par le biais de la communication entre machines en traitant automatiquement les données qui deviennent plus manipulables. Dans ce contexte, les ontologies jouent un rôle essentiel qui s'incarne dans la réalisation du web sémantique car elles ont la capacité de prendre en charge l'aspect sémantique et le raisonnement. Par ce fait, les ontologies présentent des données structurées avec une formalisation sémantique ce qui induit à la génération de ressources accessibles, partageables et manipulables par des machines.

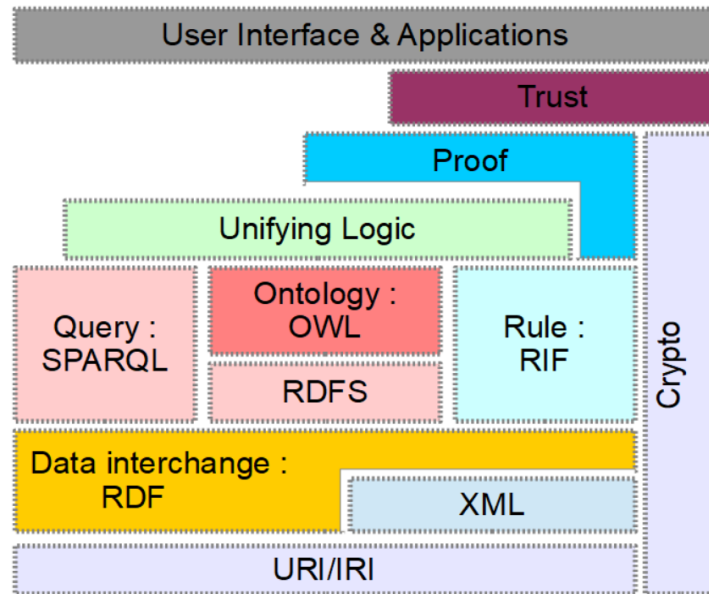


FIGURE 2.6 – Illustration de la pile du web sémantique

Par ailleurs, les technologies du web sémantique ne se résument pas qu'aux ontologies. L'architecture de ces technologies forme des couches empilées d'où l'appellation « pile du web sémantique » par le W3C. Ce dernier a standardisé l'ensemble des couches comprenant les langages et les protocoles faisant ainsi émerger l'intérêt de ces technologies pour le domaine de la recherche dans le domaine de la recherche envers ces technologies.

la Figure 2.6 illustre la pile des technologies ou chaque couche est empilée de manière à décrire les composants qui enrichissent la couche en dessous.

### 2.5.2 Vers une ontologie de la navigation maritime côtière

Le principe de l'approche ontologique sur laquelle nous nous appuyons, est que chaque concept impliqué dans la représentation d'une trajectoire est associé à une géométrie comme défini dans la formalisation proposée (cf. partie 2.4.2. Ainsi, l'ontologie doit prendre en considération la dimension spatiale et les concepts définis pour la trajectoire. Pour ce faire, nous interprétons en OWL et nous enrichissons la sémantique avec des règles SWRL tous les concepts listés

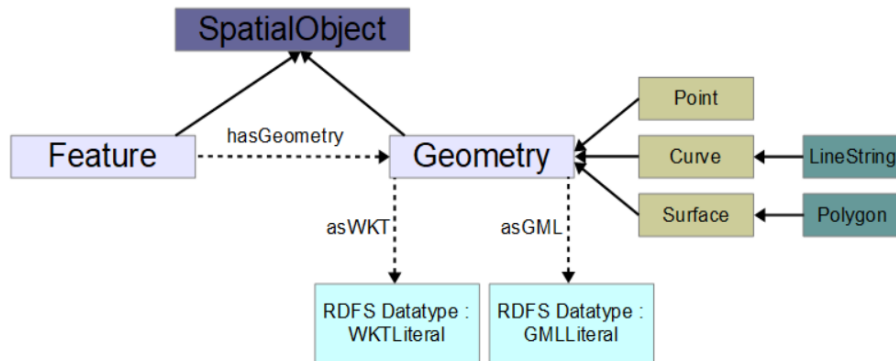


FIGURE 2.7 – Modélisation ontologique du standard GeoSPARQL

précédemment dans la définition formelle de d’une trajectoire de navigation maritime côtière et de ses composants. Dans la suite du présent chapitre, nous ne présentons pas les concepts liés aux notions de visibilité des repères (cf. Chapitre 3). La modélisation globale, que nous avons conçue, associe deux ontologies principales. L’une est définie par nos soins et s’appuie sur une autre modélisation spatiale existante : le standard de GeoSPARQL.

### 2.5.2.1 Modélisation ontologique de GeoSPARQL

Dans l’optique de construire notre propre ontologie, nous reprenons un modèle ontologique existant pour la représentation de la dimension spatiale à savoir, l’ontologie fondée sur le standard de GeoSPARQL. GeoSPARQL est un standard de représentation et d’interrogation des données géospatiales dans le contexte du web sémantique et des données liées. Comme l’illustre la Figure 2.7, ce modèle est organisé en trois classes principales : Geometry, Feature et Spatial Object.

- La classe Spatial Object est décrite par les deux classes Geometry et Feature ;
- La classe Feature représente l’entité spatiale dans l’environnement, par exemple un monument ;
- La classe Geometry englobe toutes les formes géométriques définies par l’OGC, par exemple Point.

Les relations dans ce modèle comprennent principalement le vocabulaire des relations topologiques définies dans les travaux des 9-intersections ou du RCC8 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 deuxième sous-relation *asGML* permet de présenter et de manipuler des informations géographiques dans un langage provenant du XML.

Comme mentionné auparavant, nous associons chaque concept d'une trajectoire maritime à une forme géométrique. Pour cette finalité, nous étendons l'ontologie de GeoSPARQL. Plus précisément, nous enrichissons la classe *Feature* avec les concepts de la trajectoire. Le modèle est ainsi ajusté pour la réalisation de l'application tel qu'expliquer dans ce qui suit.

### 2.5.2.2 Modélisation ontologique d'une trajectoire maritime côtière

Lors cette étape, nous reprenons les concepts définis dans la formalisation de la trajectoire maritime côtière énoncés dans la partie 2.4.2. Nous expliquons ici, la définition de la hiérarchie des classes qui interfèrent dans la définition des axiomes en OWL. En effet, dans notre ontologie, certaines classes sont définies avec des axiomes, qui correspondent aux définitions préétablies en DL.

En navigation maritime côtière, la trajectoire suit des repères qui sont définis dans la formalisation comme étant des Points. Cependant suivant le modèle de GeoSPARQL, un repère (*NavigationMark*) est une entité spatiale et doit être une sous-classe de *Feature*. De ce fait, nous interprétons le fait que le repère soit un *Point* par la relation *hasGeometry* qui lie l'entité spatiale au Point. Plus précisément, un objet spatial dans le monde réel est associé à une géométrie où les coordonnées géographiques sont décrites par le format *WKT*. Comme le décrit la Figure 2.8, 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 le *Point354*. Ainsi, le Phare "Petit Minou" et la géométrie *Point354* sont deux individus reliés par la relation *hasGeometry*. L'individu *Point354* a des coordonnées géographiques définies par un littéral qui est l'objet

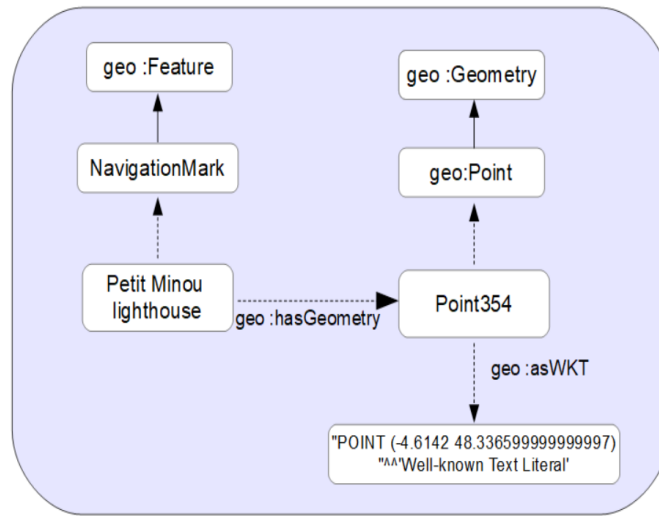


FIGURE 2.8 – Extrait d’une représentation d’une entité spatiale

de la relation *asWKT*. Le même principe de modélisation est appliqué pour tout le reste des classes afin d’associer la dimension spatiale aux concepts d’une navigation :

- chaque WayPoint est de type Feature ayant 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) appartient à la classe Feature avec une ligne comme géométrie comme pour le relèvement.

Afin de modéliser la notion d’orientation vis-à-vis du cap ou de l’angle de relèvement, la classe *Angle* est définie avec la relation *hasBAngle*, qui la relie à la ligne décrivant le relèvement (Bearing). De plus, une propriété de données de type *Float* est introduite pour représenter la valeur de l’angle d’orientation avec la relation *hasAngleValue*.

Pour maintenir la consistance de l’ontologie et interpréter correctement le modèle formel vers l’ontologie, une relation *geometryOf*,

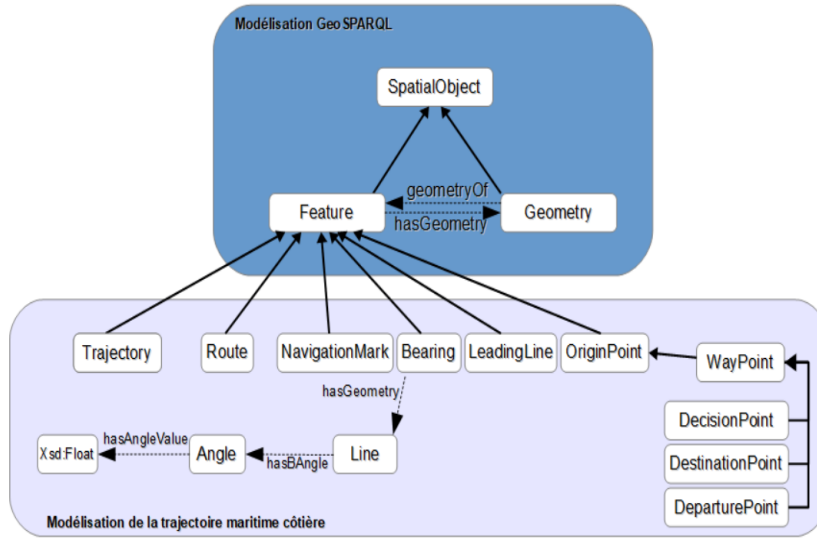


FIGURE 2.9 – Modélisation ontologique de la trajectoire en navigation côtière

inverse (reverseOf) de la relation *hasGeometry*, a été définie. Dans la formalisation, les éléments de la trajectoire sont des sous concepts d’une géométrie. Il suffit donc d’appliquer les relations topologiques directement sur ces éléments, tandis qu’avec la modélisation ontologique fondée sur le standard de GeoSPARQL, les éléments de la trajectoire ne sont pas des sous-classes d’une géométrie mais ils lui sont reliés avec la relation *hasGeometry*. En conséquences, pour appliquer les relations topologiques sur les éléments, nous devons se référer à leur description géométrique grâce à la propriété *hasGeometry*. À l’inverse, comme le raisonnement s’applique 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*.

Nous présentons dans la Figure 2.9 une vue partielle de l’ontologie de navigation maritime côtière qui représente les concepts de base du wayfinding dans le milieu maritime où les définitions font référence aux définitions en DL. Un enrichissement de l’ontologie est effectué dans la suite de nos travaux selon le besoin de raisonnement. Dans cette modélisation ontologique et comme présenté dans la partie qui suit, ces définitions sont décrites par la syntaxe Manchester OWL [Horridge et al. \(2006\)](#), utilisée dans l’éditeur d’ontologie Protégé-OWL.

### 2.5.2.3 Définition des axiomes

Le raisonnement en OWL a pratiquement le même postulat que le raisonnement en DL. Ainsi, le mécanisme d'inférence rencontre le principe de l'*Unique Name Assumption*, qui stipule que deux individus dans l'ontologie ne sont pas forcément différents. Pour faire face à cet aspect, OWL fournit deux propriétés owl :sameAs et owl :differentFrom. L'utilité de ces deux propriétés se constate dans le peuplement de l'ontologie pour différencier deux éléments et avoir le bon raisonnement. Il y a également le principe de l'Open World Assumption (OWA) et le Closed World Assumption (CWA) où la véracité de l'hypothèse dépend ou non de la présence d'une information dans la base de connaissances. Dans le OWA, si une information n'est pas connue cela n'affirme pas que cette information soit fausse. A contrario, dans le CWA, si une information n'est pas connue cela affirme explicitement que l'information est fausse, comme cela est le cas dans les bases de donnée relationnelles. De ce fait, dans la perspective de manipuler nos informations avec le mécanisme d'inférence dans l'OWA, quelques modifications ont été ajoutées aux définitions avec la syntaxe de Manchester OWL en comparaison avec les définitions faites en DL dans la partie 2.4.2.

#### Definition 1.

*Bearing EquivalentTo Feature and (not (LeadingLine)) and (hasGeometry some (Line and (contains some (Point and (geometryOf some NavigationMark))))))*

Un relèvement (*Bearing*) est un *Feature* qui a une ligne comme géométrie, exprimée ici par *hasGeometry some Line*. Cette ligne doit contenir (*contains*) un point qui fait référence à un repère (*NavigationMark*). La relation topologique *contains* est utilisée ici entre deux géométries *Line* et *Point*. Nous constatons ainsi l'intérêt de la relation *geometryOf* qui affirme que le point que contient la ligne est la géométrie d'un repère.

#### Definition 2.

*Route EquivalentTo Feature and hasGeometry some (Line that (within some (Line and ((geometryOf some LeadingLine) or (geometryOf some Bearing)))))) and (contains min 2 (Point and geometryOf some WayPoint)))*

Le Feature *Route* a une forme géométrique linéaire qui est contenue (*within* : relation topologique) dans une autre ligne. Cette dernière est la géométrie d'un alignement (*LeadingLine*) ou bien la géométrie d'un relèvement (*Bearing*). De plus, la ligne doit contenir au moins deux *WayPoints*. Nous notons ici que comme pour la formalisation en DL, il est possible d'exprimer la restriction cardinale avec la syntaxe Manchester OWL.

**Definition 3.**

*Trajectory EquivalentTo Feature that hasGeometry some ('Line String' that contains min 1 (Line that (geometryOf some Road) and (contains some (Point that geometryOf some DeparturePoint)) and (contains some (Point that geometryOf some DestinationPoint))))*

une trajectoire est décrite par une géométrie sous forme de ligne polygonale (*LineString*) et contient (*contains* : relation topologique) au minimum une ligne qui doit être la géométrie d'une route. Elle doit également contenir un point faisant référence au point de départ et un autre point qui décrit le point d'arrivée. La dernière contrainte (*(contains some (Point that geometryOf some DestinationPoint))*) est établie afin d'éviter que le raisonnement infère une partie de la trajectoire qui est une ligne polygonale mais qui ne décrit pas toute la trajectoire.

## 2.6 cas d'utilisation

Afin de mieux assimiler le rôle de l'ontologie définie dans l'inférence et la modélisation des trajectoires, nous présentons dans cette partie un exemple de peuplement d'ontologie qui infère la trajectoire. Cependant, nous supposons dans ce cas d'utilisation que les points de décision et les lignes de visibilité sont connus dans la base de connaissances car plusieurs inférences sont faites au préalable pour les définir. Le raisonnement sur les lignes de visibilité est abordé dans le Chapitre 2 quant aux inférences des points de décision, elles seront abordées dans le Chapitre 4. Pour tester les inférences via le modèle, des instructions établies par des experts de la navigation maritime seront le fondement du peuplement de l'ontologie. Dans un premier temps, nous présentons le peuplement de l'ontologie à l'aide des instructions. Ensuite, nous décrivons les résultats des inférences.

### 2.6.1 Peuplement de l'ontologie

les instructions présentées ci-dessous, décrivent les routes d'une trajectoire. Chacune de ces routes prend cap sur un ou plusieurs amers. Pour peupler l'ontologie, nous prenons chaque information importante pour la wayfinding dans les instruction et nous lesinstancions. Cependant, les routes, les relèvements et la trajectoire doivent être inférés et non pas instanciés. En ce qui concerne les alignement, ils sont définis au préalable car une extraction peut très bien être établie à partir des instructions nautiques ou les cartes maritimes.

**Instruction 1** : départ du port Brest. Route au 254°, en relèvement constant sur le phare du Petit Minou.

**Instanciation** : Un feature, *Feature1* est défini dans l'ontologie avec une géométrie, *Line1*. Cette ligne est associée à *Feature1* grâce à la relation *hasGeometry*. De plus, cette ligne est formée par deux points, *PointA* et *Point562*, représentant respectivement les géométries du *Port de Brest* (de type *DeparturePoint*) et le premier point de décision, *DecisionPoint1*. Aussi, la relation topologique *contains* associe *Line1* aux 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*),*Point364*) est introduite dans l'ontologie par la relation topologique *contains*. Ensuite nous identifions la relation topologique *within* entre la *Line1* et *Line6*.

**Instruction 2** : route au 240°, en relèvement constant sur le phare du Portzic.

**Instanciation** : nous définissons le Feature2 et sa géométrie Line2 (*Feature2 hasGeometry Line2*). La ligne décrite ici est définie par le premier point de décision qui a la géométrie *Point562* et un deuxième point de décision *Point563*. Comme pour la première instruction nous introduisons la relation topologique *contains* pour relier Line2 à ces deux points qui la forme. Le Portzic est également un individu dans l'ontologie (de type *NavigationMark*) lié à une géométrie *Point353*. Une nouvelle ligne, *Line7* est créée et étant la géométrie de *VisibleLine2*, elle est associée aux deux points *Point562* et *Point353* par la relation *contains*. La relation topologique *within* relie Line2 à Line7.

**Instruction 3** : route au  $254.5^\circ$ , en relèvement constant sur la bouée Mengam.

**Instanciation** : comme les deux autres instanciations, un Feature3 est décrit dans l'ontologie avec une géométrie Line3. Cette dernière est reliée avec deux points grâce à la relation contains. Ces points représentent deux points de décision. Autrement dit, les relations suivantes sont instanciées : la géométrie Line3 contient (contains) Point563 ainsi que le Point564. Le NavigationMark Mengam est associé à une géométrie de type Point (Point568). Ce NavigationMark est visible à partir du deuxième point de décision (Point563). Ainsi, une VisibleLine3 est créée dans l'ontologie avec comme géométrie Line8 qui contient (contains) le Point563 et le Point568. La relation topologique within va lier les deux lignes tel que Line3 est topologiquement dans (within) Line8.

**Instruction 4** : route au  $156.5^\circ$ , sur l'alignement deux pointes rocheuses, Tas de Pois.

**Instanciation** : Une ligne (Line3) est créée afin de décrire la géométrie d'un individu Feature4 instancié lui aussi dans l'ontologie. Cette ligne est formée par les deux points Point564 et Point565 qui représentent respectivement la géométrie du troisième et du point d'arrivée qu'on a supposé (DecisionPoint3 et DestinationPoint dans l'ontologie). Ces deux points sont liés à la ligne par la relation topologique (contains). Les deux pointes rocheuses Tas de Pois sont de type NavigationMarks et sont décrites dans l'ontologie par (*Tas de Pois Peak 1* et *Tas de Pois Peak 2*). Deux géométries de la classe Point leur sont associées (respectivement : Point569 et Point570). La particularité de cette route est qu'elle est orientée sur un alignement. Ce dernier est représenté dans l'ontologie par LeadingLine1 et a une géométrie Line9 qui est liée aux géométries des pointes rocheuses par la relation topologique contains. De plus, une géométrie LineString4 est formée par les différents géométrie des WayPoints (DeparturePoint, DecisionPoint et DestinationPoint). Cette ligne polygonale décrit la géométrie d'un individu de type Feature (Feature4).

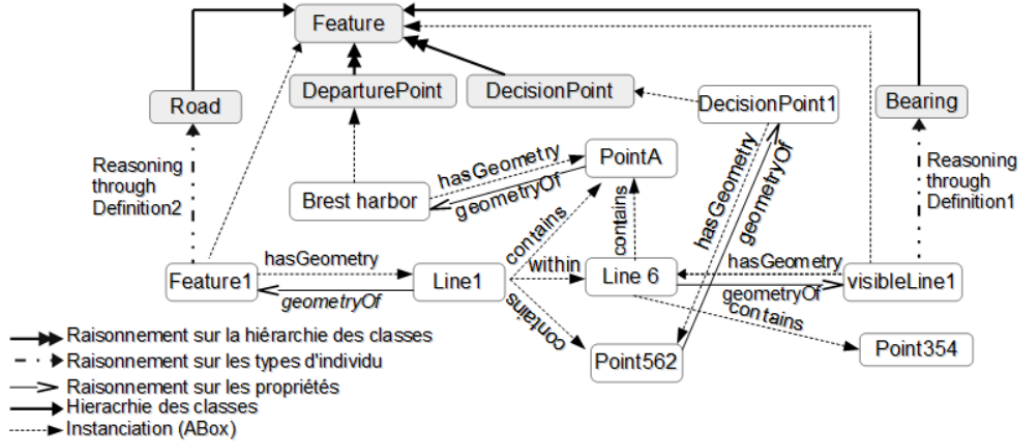


FIGURE 2.10 – Illustration des instanciations et des résultats du raisonnement

### 2.6.2 Résultats du raisonnement

la consistance de notre modèle et l'efficacité du raisonnement sont vérifiées avec l'outil *Protégé* associé au raisonneur *Pellet* (incrémental). La représentation partielle des connaissances, illustrée dans la Figure 2.10, montre le résultat que nous devons avoir via le modèle proposé. Étant donné que le point de départ du **Port de Brest** a comme géométrie (*hasGeometry*) **PointA** et le premier point de décision (**DecisionPoint1**) a comme géométrie le **Point562**, le raisonneur (*Pellet*) infère la relation *geometryOf* entre les instances car cette relation est définie comme l'inverse de la relation *hasGeometry*. Par ailleurs, la ligne **Line1** contient le **PointA** et le **Point562**. La ligne est dans une autre ligne **Line6** qui contient le **PointA** et le **Point354**. Ce dernier Point est la géométrie du repère **Pointe du Petit Minou**. Ainsi, en appliquant la *Définition 1*, nous aurons l'inférence d'un individu de type *Bearing* qui est **VisibleLine1** avec **Line6** comme géométrie. Cette inférence permet au raisonneur d'inférer une autre connaissance avec la *Définition 2*. En effet, l'individu **Feature 2** sera de type *Route* car les conditions sont toutes présentes et satisfont la deuxième définition pour que l'individu soit inféré comme tel. Le raisonnement suit des déductions incrémentales. En conséquence, à chaque inférence des nouveaux individus, ces derniers peuvent être des conditions dans l'inférence de nouvelles informations. La suite logique du raisonnement selon les instanciations, comme pour le cas des premières déductions, entraîne l'inférence de

textbf *VisibleLine2* et ***VisibleLine3*** comme de type *Bearings* avec la *Définition 1* et les instances ***Feature2***, ***Feature3*** ainsi que ***Feature4*** seront inférées de type *Route* à travers la *Définition 2*. Toutefois, l'individu ***Feature4*** a une géométrie ***Line4*** qui est topologiquement dans une autre ligne ***Line9*** qui est à son tour la géométrie d'un individu de type *Leading Line* et non de type *Bearing*. A l'issue de ces déductions incrémentales, la ligne polygonale ***LineString4*** formées par toute les lignes définissant les géométrie des individus de type *Route* permettra d'inférer ***Feature6*** comme étant de type *Trajectory*. Ceci avec l'application de la *Définition 3* qui est conditionnée sur la *LineString4*, géométrie de *Feature6* par inférence. Nous recensons dans la Table 2.2 les résultat obtenu grâce au raisonneur Pellet.

| Bearing                                      | Route                                        | Trajectory |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------|
| VisibleLine1<br>VisibleLine2<br>VisibleLine3 | Feature1<br>Feature2<br>Feature3<br>Feature4 | Feature6   |

TABLE 2.2 – Le résultat du raisonnement à travers le modèle dans le cas d'utilisation

## 2.7 Conclusion

Le présent chapitre décrit le modèle ontologique de base d'une trajectoire de navigation maritime côtière. Cette dernière s'appuie sur les repère pour l'orientation et former ainsi des routes qui composent la trajectoire. Nous avons, dans un premier temps, présenté les étapes de la conceptualisation et de l'identification des concepts nécessaires faites grâce aux descriptions textuelles et graphiques des trajectoires. A partir de ces étapes, la formalisation des différents concepts a été établie en DL afin d'aboutir à une modélisation ontologique. Dans la formalisation nous associons chaque objet de la trajectoire à une géométrie afin d'appliquer l'aspect du raisonnement spatial. Ainsi, la modélisation de Geosparql nous a permis de satisfaire cette condition en étendant la classe *Feature* avec les concepts

de la trajectoire. De plus, différents concepts sont définis par des axiomes en DL et le reste est défini comme des concepts atomiques. La formalisation en DL nous a permis de basculer plus aisément vers la modélisation ontologique. Ceci est possible avec l'utilisation des technologies du web sémantique notamment le OWL et les SWRL.

Une fois l'ontologie déterminée, avec la définition des concepts atomiques et complexes, l'inférence de la trajectoire est explicitée à travers un cas d'utilisation. Pour ce faire, tous les individus de base nécessaires à la bonne inférence de la trajectoire sont initialisés. Les individus de type `VisibleLine` et de type `DecisionPoint` sont initialisés dans l'exemple donné et n'ont pas été inférés. Cependant, ils doivent l'être à travers leurs définitions en DL ou en règles SWRL comme nous allons le constater dans les prochains chapitres. Comme illustré dans la Table 2.3 le raisonnement devrait suivre ce même récapitulatif. Plus précisément, à partir du peuplement d'ontologie par les repères (`NavigationMarks`), le point de départ (`DeparturePoint`), le point de destination (`DestinationPoint`) et les alignements (`LeadingLine`), le raisonneur doit inférer les relèvements (`Bearing`), les points de décision (`DecisionPoint`), les waypoints, les routes et enfin la trajectoire (`Trajectory`).

| Individuals/Roles             | Assertions | Inférences |
|-------------------------------|------------|------------|
| <code>NavigationMarks</code>  | ✓          |            |
| <code>DeparturePoint</code>   | ✓          |            |
| <code>DestinationPoint</code> | ✓          |            |
| <code>WayPoint</code>         |            | ✓          |
| <code>Bearing</code>          |            | ✓          |
| <code>LeadingLine</code>      | ✓          |            |
| <code>DecisionPoint s</code>  |            | ✓          |
| <code>Route</code>            |            | ✓          |
| <code>Trajectory</code>       |            | ✓          |

TABLE 2.3 – Les inférences possibles globales à travers le modèle

Le prochain chapitre traite le raisonnement associé aux notions de la visibilité. Ce qui nécessite un enrichissement de la base de connaissances avec de nouveaux concepts ou relations relatifs à l'inférence

des lignes de visibilité. Nous établissons ainsi, des définitions de règles SWRL permettant de déduire si un repère est visible ou non à partir d'un point qui est le **point d'origine**. De plus, nous introduisons différentes définitions pour expliciter la notions spatiale appliquée à la notion sémantique de la visibilité.



# Chapitre 3

## Les zones de visibilité et leur inférence dans le modèle

”Le visible ouvre nos regards  
sur l’invisible”

---

Anaxagore

### 3.1 Introduction

Différentes recherches dans plusieurs domaines d’application ont prouvé que les technologies du web sémantique sont efficaces dans la modélisation sémantique. Dans le cas de nos travaux, certains aspects sémantiques contribuent à l’enrichissement de l’environnement maritime comme l’affordance des repères. A titre d’exemple, certains repères sont utilisés pour les alignements et d’autres dans le cas d’un phénomène météorologique tel que le brouillard. Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une ontologie qui modélise les concepts principaux d’une trajectoire maritime côtière dans un contexte de wayfinding. Le langage OWL avec lequel nous avons décrit les connaissances nous a permis de prendre en compte différentes inférences liées à la trajectoire. Nous présentons dans ce chapitre, l’enrichissement de l’ontologie afin de prendre en compte l’inférence des individus liés à la notion de visibilité. Autrement dit, l’ontologie doit répondre à la question « quel repère choisir pour réorienter le bateau sur un autre cap et suivre un repère visible à partir d’un point ? ». Cet enrichissement concerne essentiellement l’introduction d’un mécanisme de raisonnement à base de règles. Ces règles améliorent l’expressivité des données de la navigation maritime et comble le besoin des inférences associées à la visibilité. Plus

explicitement, les inférences prises en charge par les règles sont destinées à renseigner l'ontologie avec de nouvelles données. Ces données décrivent les zones de visibilité à partir desquelles les repères peuvent être perçus. Ceci déclenche le raisonnement via les définitions des axiomes en OWL et plus précisément, l'instanciation des lignes de visibilité en aboutissant ainsi à la trajectoire.

Dans ce qui suit, nous expliquons dans un premier temps, les principes de visibilité et nous présentons les nouveaux éléments de l'ontologie qui lui sont associés. Ensuite, nous introduisons la stratégie des règles en utilisant la technologie du web sémantique et nous proposons ainsi les règles qui permettent de sélectionner les bons repères, sur lesquels la route peut s'orienter, en considérant leur état de visibilité dans l'environnement. Une fois les règles définies, un cas d'utilisation est adapté afin de mieux comprendre l'utilisation et le rôle de ces règles dans notre approche.

## 3.2 Visibilité des repères dans la planification des routes

Planifier une trajectoire maritime côtière requière nécessairement des amers qui sont d'une manière générale connus sous le noms de « landmarks » dans la littérature des travaux liés au wayfinding en milieu urbain ainsi que dans les cartes nautiques électroniques (ENC– couche thématique LNDMRK dans le format S57). Dans le contexte de la planification des routes, différentes approches ont été réalisées. Toutefois, la navigation fondée sur les landmarks n'est pas souvent employée dans les systèmes de routage. Cependant, ils sont essentiels dans certains ouvrages nautiques (instructions nautiques, pilotes côtier [Rondeau \(2007\)](#)) afin de guider le navigateur. Les repères sont des objets clés qui aident les individus à s'orienter dans un environnement qui leur est non familier. Dès lors, enrichir le routage avec les landmarks est une tâche cruciale dans les système d'aide à la navigation afin de fournir des services d'orientation plus performants ([Montello and Sas \(2006\)](#)). En dépit des avantages qu'offrent les repères dans le processus de routage, certaines problématiques comme leur sélection et leur identification doivent être abordées. Diverses recherches dans ce domaine ont été menées pour choisir les repère les plus appropriés, et ce grâce à leurs mesures de visibilité. Ces dernières sont largement considérées comme des mesures quantitatives. Dans les travaux de [Nothegger et al. \(2004\)](#), un modèle computationnel est proposé dans l'objectif de mesurer la saillance des

objets dans l'environnement à partir d'un point de décision. De plus, ces travaux montrent que l'identification des repères est majoritairement influencée par des paramètres d'attraction et de visibilité. Les mêmes critères d'identification sont abordés dans les travaux de [Raubal and Winter \(2002\)](#) où l'extraction des repères locaux est appliquée en évaluant trois aspects de saillance (visuelle, sémantique et structurelle). Plus spécifiquement, l'auteur construit différentes fonctions d'évaluation pour chaque aspect. Le domaine de la robotique est aussi concerné et influencé par les paramètres de visibilité. Par exemple, le travail explicité dans [Hayet et al. \(2010\)](#) essaye de déterminer s'il existe un chemin qui maintient la visibilité des repères ou pas. Une autre approche fondée sur l'observation des landmarks est développée par [I. Sala et al. \(2006\)](#) où l'objectif est d'effectuer la localisation du robot. Des principes identiques de localisation par triangulation sont utilisés en navigation maritime. D'une manière générale, les méthodes et les approches dans le cadre de la visibilité des repères sont majoritairement employées pour la planification des routes ou dans les systèmes de localisation.

Alors que les quelques travaux susmentionnés sont concentrés sur des approches pour l'identification des landmarks via les paramètres de la saillance, d'autres travaux orientent leur recherche sur la sélection des landmarks via leur état d'intervisibilité à partir d'une région ou d'un point donné. L'intervisibilité est définie comme étant « une fonction qui calcule une zone ou une *ligne de mire* (en anglais : line-of-sight) qui peut être perçue à partir d'une ou de plusieurs localisations spécifiques » [Center \(1994\)](#). Selon [Wither et al. \(2013\)](#); [Papadopoulos et al. \(2010\)](#), évaluer la visibilité des landmarks est une tâche difficile. Ainsi différentes modélisations ont été conçues afin de fournir une mesure de zone de visibilité quantitative. Un *bassin visuel* (en anglais : viewshed) souligne les zones qui peuvent être perçues à partir d'un point d'observation donné, générées par les lignes de mire reliant un point à toutes les autres localisations dans la zone étudiée [Bartie et al. \(2008\)](#). Le service proposé dans le système *Pharos*, défini par [Wenig et al. \(2017\)](#), emploie le concept de bassin visuel et suggère une carte détaillée sur la visibilité des landmarks pour certains points donnés. Analyser la visibilité à partir d'un point exige le calcul ou l'évaluation d'une ligne de mire à partir d'un point d'origine vers la cible (le repère). Cette dernière définition est identifiée comme une *simple intervisibilité* [Guth \(2004\)](#) sur laquelle nous portons notre intérêt du fait que nous ne considérons que le point de vue égocentrique afin de sélectionner un repère –pour le changement de cap– et ainsi l'orientation des routes.

### 3.2.1 Notions de visibilité des repères en navigation maritime côtière

Comme expliqué précédemment, les repères sont considérés comme les principales références d'orientation en navigation maritime côtière. Comme défini par [Siegel and White \(1975\)](#), un repère est un objet environnemental constitué par des caractéristiques imposantes ou importantes, qui est unique et contraste avec le voisinage. Dans notre étude, ces repères saillants sont connus grâce aux données spatiales fournies par le SHOM (les coordonnées géographiques des repères). De ce fait, nous n'abordons que la problématique relative à la sélection des amers et non pas leur identification et ceci grâce à les critères de visibilité. En d'autres termes, la perspective ici est de sélectionner les repères visible à partir d'un point de vue (celui du bateau) et qui contribue à la définition d'une route sans danger et ainsi à la génération d'une trajectoire à suivre. Le concept de la profondeur qu'exige une route sécurisée et le choix d'un amer visible plutôt qu'un autre ne sont pas pris en compte. Ils peuvent être relatifs aux choix de l'utilisateur, à ses préférences ou intégrés dans le filtrage d'un l'algorithme de routage.

Nous avons expliqué dans les chapitres précédents que la direction des routes est contrainte par un relèvement sur un amer ou un alignement sur au moins deux amers. Plus précisément, la route suit une ligne à partir d'un point. La ligne établie ici correspond à la ligne de relèvement dans la terminologie maritime et n'est formée que si le repère est visible. Elle forme alors la ligne de visibilité (*VisibleLine* dans l'ontologie). Le concept de visibilité est par ailleurs contraint par des facteurs dynamiques liés au monde réel qui doivent être pris en charge dans une modélisation. Dans ce cadre, nous résumons les trois aspects qui influencent l'état de la ligne de visibilité :

- **Influence spatiale** : la visibilité est liée à la *distance horizon* – distance jusqu'à la rotondité de la terre–. Dans les travaux, la distance horizon est définie comme la distance limite pour un être humain regardant l'horizon au-dessus du niveau de la mer. Toutefois, la visibilité n'est pas seulement liée à la distance horizon mais aussi à l'élévation du repère. De plus, certaines entités spatiales dans l'environnement et la topographie terrestre peuvent être des obstacles pour percevoir un repère. A titre d'exemple, une colline ou une pointe peut obstruer la visibilité d'un phare.
- **Influence temporelle** : la navigation de jour diffère de la navigation

de nuit. Cette dernière s'appuie sur les amers dotés d'un ou plusieurs feux comme les phares ou les bouées.

- **Influence des conditions météorologiques** : la visibilité est fortement affectée par les conditions climatiques comme le brouillard ou la brume. Dans de telles conditions, certains repères deviennent invisibles. Nous devons alors nous référer à la *visibilité horizontale* fournie par les services météorologiques qui indique à quelle distance nous distinguons clairement un objet dans l'environnement. En outre, la visibilité est influencée par le fait que le repère est équipé d'un feu ou pas.

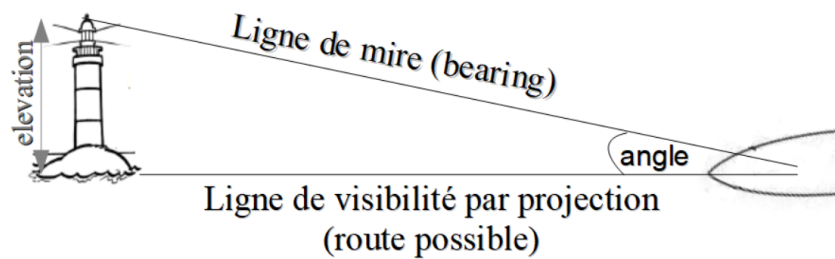


FIGURE 3.1 – Relèvement autant que ligne de mire

### 3.2.2 Analyse graphique de la notion de visibilité

Dans le chapitre précédent, chaque concept de la trajectoire, dans l'ontologie, est associé à une géométrie. Afin de procéder à l'extension de cette même ontologie avec les éléments de visibilité, nous devons respecter le même modèle et analyser géométriquement les notions de visibilité.

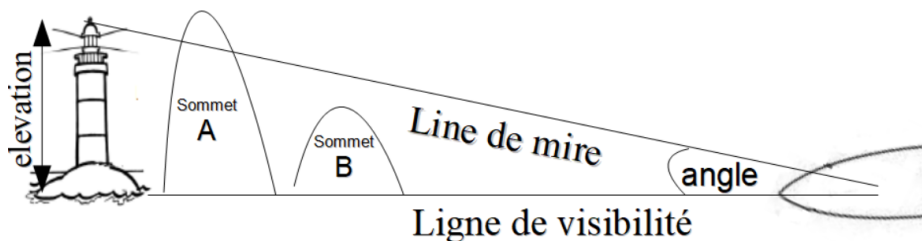


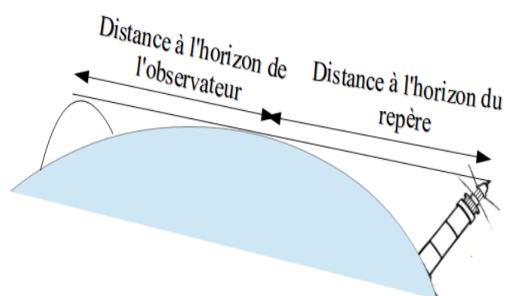
FIGURE 3.2 – Modélisation de la visibilité fondée sur la ligne de mire

Nous avons défini le relèvement comme une ligne de visibilité dans la formalisation de la trajectoire. Cette ligne forme un angle entre la position initiale (c.-à-d. la position du bateau) et le repère. Dans le contexte de la visibilité *le relèvement décrit la ligne de mire* comme le montre la Figure 3.1. L'intervisibilité simple, sur laquelle nous nous appuyons, définit si un repère est visible ou non à partir d'une position et le contraire est aussi valable (c.-à-d. si la position du bateau est perçue à partir de l'amer). Dans cette mesure, l'élévation d'un obstacle donné se trouvant entre l'amer et la position du bateau ne doit pas dépasser l'élévation de la ligne de mire. Dans le cas contraire, la vue du repère est obstruée. Dans la Figure 3.2, le "sommet A" est considéré comme une obstruction et le phare est ainsi non visible à partir du bateau.

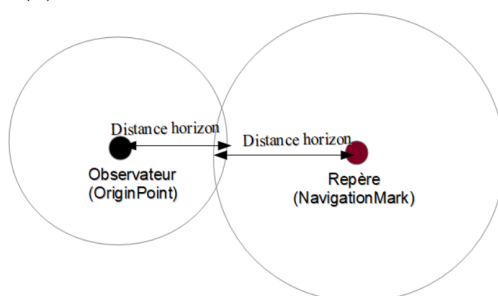
L'autre aspect de visibilité à prendre en considération concerne la prise en compte de la rotondité terrestre. Dans ce contexte, la plus grande distance à laquelle un observateur peut apercevoir un objet est définie par la distance horizon à partir de la position de l'observateur additionnée à la distance horizon à partir du repère tel que le montre la Figure 3.3a. Ces distances de visibilité forment ce que nous appelons des **zones de visibilité**. La modélisation géométrique de ce concept de zone est décrit par l'illustration de la Figure 3.3b.

La **distance horizon** est la distance maximale à laquelle un être humain peut regarder l'horizon au-dessus du niveau de la mer. A partir de la modélisation géométrique, nous constatons que ceci correspond à un cercle où le rayon est défini par cette même distance. Cette dernière est déterminée par une fonction contrainte par le rayon de la terre et l'élévation au niveau de la position d'observation. Plus la position d'observation est élevée, plus le rayon du cercle est important. Ainsi, deux cercles sont impliqués afin de déterminer si un repère est visible : l'un des cercles détermine la distance horizon à partir de la position du bateau quant à l'autre, il définit la distance horizon à partir du repère. Ce dernier est donc visible par l'observateur si et seulement si les deux cercles satisfont les relations topologiques d'intersection.

Dans le cadre d'une navigation de nuit ou par condition météorologique difficile (brouillard, brume, etc.), la notion de visibilité est prise en compte différemment. Dans un tel cas, la distance de visibilité requière le calcul de visibilité d'un feu. En d'autres termes nous évaluons la **portée du feu** qui désigne sa distance de visibilité. Ainsi, une zone de visibilité est délimitée par cette distance de portée qui décrit le rayon d'un cercle de visibilité. De même, par condition météorologique difficile, la zone de visibilité est également définie par un cercle qui se démarque par un rayon



(a) Concept de la distance à l'horizon

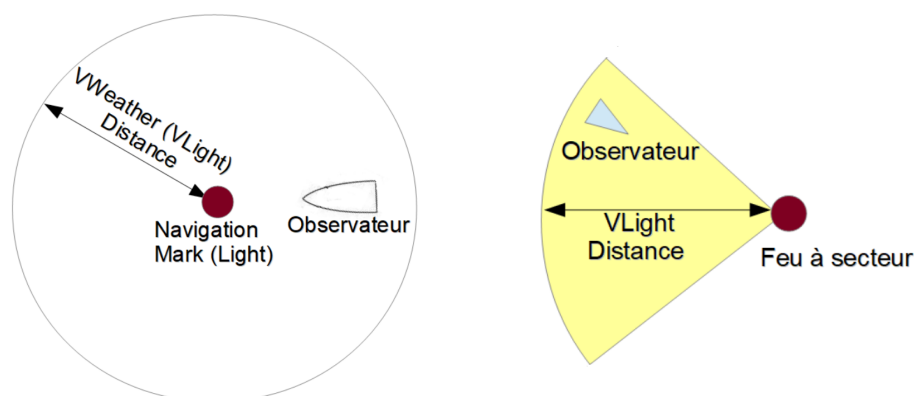


(b) Une intersection non nulle des deux zones de visibilité à l'horizon permet d'affirmer la perception du repère par l'observateur

FIGURE 3.3 – Visibilité de l'objet selon le critère de la distance à l'horizon

désignant la distance communiquée par le service météorologique. Pour résumer, d'un point de vue géométrique, le navigateur doit être à l'intérieur des deux zones de visibilité (celle de la portée du feu et la **visibilité météorologique**) car il arrive que ces zones ne soient pas définies à la distance horizon. La Figure 3.4a décrit le principe que nous venons d'énoncer.

Il est important de noter que la forme géométrique de la zone de visibilité, relative à la portée du feu, n'est pas systématiquement circulaire mais dépend de la catégorie du feu, indiquée dans la base de données spatiales fournie par le SHOM. En effet, cette zone de visibilité peut former un secteur circulaire qui définit un intervalle angulaire pour garantir la sécurité de la route dans une certaine direction. Ce secteur circulaire est un polygone borné par deux lignes et une série de points définie à la distance de la *portée du feu* à partir du centre, qui détermine la position du feu, comme le montre la Figure 3.4b.



(a) Zone de visibilité (portée du feu -zone de visibilité pour un feu de catégorie conditions météorologiques) associée à un amer  
(b) Secteur circulaire correspondant à la directionnelle

FIGURE 3.4 – Influences des conditions météorologiques et des feux sur la visibilité

### 3.3 Enrichissement de l'ontologie par les éléments des zones de visibilité

L'objectif d'étendre le modèle ontologique défini précédemment se résume dans la possibilité d'**inférer les zones de visibilité** des repères dans un premier temps et de déterminer ensuite, si ce repère est visible ou pas à partir d'un point d'observation. Dans ce qui suit, nous présentons une extension du modèle en intégrant les concepts de visibilité dans le but de sélectionner l'amer adéquat pour tracer une route.

Nous avons présenté ci-dessus, l'analyse graphique des notions de visibilité des amers, conformément aux différentes influences spatiales, temporelle et météorologiques. Cette analyse met en avant – comme pour les autres concepts de la trajectoire – les concepts de visibilité qui peuvent être associés à des primitives géométriques. Pour chaque repère, une zone spatiale est formée à partir des distances de visibilité et peut être incluse dans notre modèle comme l'explique la partie qui va suivre.

#### 3.3.1 Définition de la hiérarchie des concepts de visibilité

Le modèle doit prendre en charge la visibilité liée à l'horizon, aux conditions météorologiques et à la portée d'un feu qui sont dénommées

respectivement dans l'ontologie par *VHorizon*, *VWeather* et *VLight*. Chacun de ces trois concepts est indirectement des sous-classes de l'entité Feature (Geosparql). Plus précisément, une classe nommée **Visibility** est définie comme une sous classe directe de Feature et elle englobe les trois concepts de visibilité. La Figure 3.5 illustre l'enrichissement conceptuel. La hiérarchie développée ici est une conséquence du fait que la visibilité est modélisée par un cercle ou un polygone –dans le cas du secteur circulaire de la portée du feu–. Nous aurons ainsi respecté le principe du modèle Geosparql où les Fetaures sont assimilés à des formes géométriques. D'autres éléments sont ajoutés au modèle afin de le compléter. Chaque repère (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 *VLight* et *VWeather*. Nous attribuons le paramètre de hauteur aux concepts *NavigationMark* et *Light* par la propriété de donnée **hasHeight**. Cette hauteur est employée comme paramètre dans le calcul et l'inférence de la zone de visibilité relative à l'horizon. Enfin, l'attribut **LightCategory** décrivant la catégorie du feu est ajouté à l'ontologie en tant que concept.

Spécifier qu'un objet est visible dans l'ontologie, revient à peupler d'abord les concepts *VHorizon*, *VWeather* et *VLight* et ceci via des inférences. Ensuite, le modèle adopte le concept de la ligne de mire pour vérifier s'il n'y pas d'obstacle qui représente une obstruction de l'élément à percevoir à partir d'un point de référence. Ainsi, le concept *VisibleLine* est peuplé à son tour par une ligne formée entre chaque *OriginPoint* et un *NavigationMark*. Toutefois, quand un individu de type *VisibleLine* est identifié, il doit être complété par l'information qui assigne la véracité de la visibilité. Ce qui nous mène à définir un état (vrai ou faux) – un amer est visible ou pas – pour chaque instanciation de type *VisibleLine*. Pour ce faire, nous affectons à ce dernier concept, la propriété de type de données **VisibilityStm** (type booléen). L'extension conceptuelle de l'ontologie qui prend en compte la modélisation de l'aspect de visibilité est décrite dans la Figure 3.5.

Théoriquement, l'expressivité de OWL qui intervient dans la description

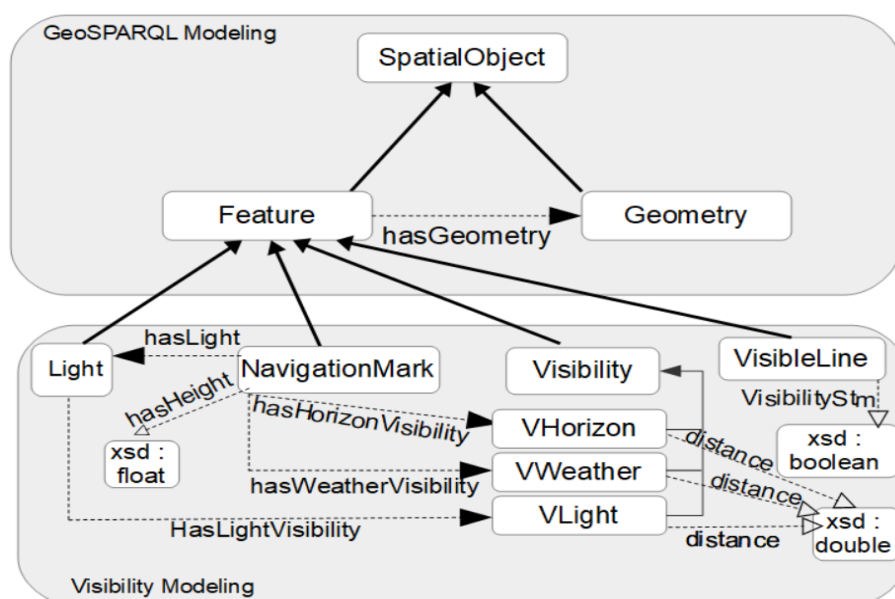


FIGURE 3.5 – Extension de l’ontologie avec la notion de visibilité relative aux repères

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 dans cette étape de nos travaux. Plus précisément, les coordonnées géographiques des géométries (cercle ou polygone) relatives aux concepts de visibilité doivent être inférées. Ces coordonnées seront définies par le format WKT décrit dans le domaine par la propriété de type de données *as WKT*. Par ailleurs, si un objet est visible à partir d’un point, ce fait doit être inféré entre l’individu de type *OriginPoint* et l’individu de type *NavigationMark*.. Ceci forme une ligne de visibilité entre ces deux points dont l’état est à vrai et qui doit également être inféré. Pour combler les inconvénients de raisonnement du langage OWL nous faisons appel à la technologie SWRL qui permet de faire des inférences par règles dans le web sémantique. Ceci nous permettra de compléter notre modélisation avec une nouvelle expressivité sémantique qui peut traiter et supporter le dynamisme engendré par la notion de visibilité.

### 3.3.2 Règles SWRL et inférences des zones de visibilité

Les règles SWRL que nous définissons doivent être aussi génériques que possible dans le but d’accroître leur portabilité sur d’autres applications. La compréhension du mécanisme de raisonnement n’aboutit pas sans la

compréhension des notions de la logique des prédicats et comment celle-ci est adoptée afin d'enrichir la sémantique des connaissances. Aussi, il est nécessaire de comprendre les stratégies du mécanisme qui déclenche le raisonnement et génère les inférences. De ce fait, nous abordons dans un premier temps, les principes syntaxique et stratégique des règles SWRL.

### 3.3.2.1 Notions sur les règles en SWRL

Acronyme pour « *Semantic Web Rule Language* », SWRL est destiné à être le système de règles des technologies du web sémantique. Défini comme la combinaison des langages OWL-DL/OWL-Lite (sous-langages de OWL) avec RuleML (Rule Markup Language), il intègre ainsi une syntaxe haut-niveau qui respecte la logique de *Horn*. Cette dernière décrit une condition et permet de déduire de nouveaux faits dans une base de connaissances. Syntaxiquement, la logique de *Horn* est exprimée par une disjonction d'atomes où un seul terme est positive comme suit :  $\neg B_1 \vee \neg B_2 \vee \dots \vee \neg B_n \vee H$ . Dans le calcul propositionnel cette expression est équivalente à la formalisation suivante :  $B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_n \implies H$ . Cette dernière syntaxe se lit intuitivement « si nous avons les propositions de  $B_1$  à  $B_n$  alors nous dirons que  $H$  existe ».

La syntaxe d'une règle SWRL s'appuie sur cette dernière expression logique qui se compose d'antécédent appelé le corps de la règle « en anglais : Body » et qui est défini ici par les atomes  $B_i$ . L'expression se compose également d'une conséquence appelée tête de la règle « en anglais : Head » et définie dans la syntaxe par l'atome  $H$ .

Chaque atome est désigné par des prédicats unaires, binaires ou n-aires. Ces prédicats peuvent caractériser :

- Un concept atomique  $C(x)$  où «  $C$  » désigne une description en OWL.
- Une propriété  $P(x,y)$  où «  $P$  » désigne une relation en OWL.
- Une propriété de type de données en OWL.
- Les relations  $sameAs(x,y)$  et  $differentFrom(x,y)$ .
- Un `builtIn` (`r,x,...`) qui détermine une fonction préétablie par un utilisateur afin d'étendre l'expressivité.

Il est à noter que  $x$  et  $y$  peuvent représenter des variables, des individus en OWL ou des valeurs littérales en OWL. Quant à " $r$ ", c'est un paramètre de sortie qui peut être destiné à recevoir des valeurs explicitement littérales (par forcément booléenne), déduites suite à l'exécution d'une fonction `builtIn`

qui n'est pas forcément de type booléens.

Les règles SWRL suivent la conception du principe « DL-safe rule ». Ceci signifie que chaque argument ou paramètre des atomes existants dans la conséquence doivent aussi exister dans le corps de la règle. Ceci en vue de maintenir la consistance de l'ontologie lors du processus de raisonnement.

### 3.3.2.2 Stratégie du mécanisme de raisonnement avec le règles SWRL

Les inférences avec SWRL suivent un processus de raisonnement déductif qui est une stratégie descendante ou ascendante. ce qui signifie que l'on part du principe qu'avec un ensemble de prémisses nous arrivons à une conclusion, ou qu'à partir d'un fait résultant d'une autre règle on arrive à la conclusion de la règle courante.

**Chaînage avant** : défini aussi comme le chaînage dirigé par les données, il permet d'enrichir de nouveaux faits en appliquant des règles suivant le principe de Modus Ponens. Dans cette stratégie, chaque conclusion est considérée comme un nouveau fait qui déclenche l'exécution d'autres règles et ainsi le cycle d'application des règles est exécuté tant que c'est possible.

**Chaînage arrière** : il est désigné également par le chaînage dirigé par le but car le mécanisme commence par la conséquence que nous voulons satisfaire. Plus explicitement, à partir d'une conclusion, nous chercherons la règle qui l'a déduite et ensuite nous la remplaçons par l'ensemble des antécédents de la règle jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de sous-conditions et que l'ensemble devient vide.

Dans le cas de nos travaux, le système s'appuie sur un mécanisme de raisonnement qui adapte les deux stratégies de mécanisme de raisonnement.

### 3.3.2.3 Définition des règles SWRL relatives aux zones de visibilité

Les règles SWRL que nous établissons dans le cadre de notre travail sont construites avec les différents concepts et les relations de l'ontologie définies dans le chapitre précédent ainsi qu'avec son enrichissement défini dans le présent chapitre. Par ailleurs, différents builtIns sont définis afin de calculer les coordonnées géographiques de chaque zone et de les inférer comme étant des formats WKT. Nous ajoutons aussi la règle qui contribue à déduire si

un amer est visible ou non.

**Règle 1** : Visibilité à l'horizon pour le repère

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

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 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*" – liées à la zone de visibilité à l'horizon "*c*" pour l'amer "*n*" –, nous ajoutons un builtIn *HorizonArea*(?*w*, ?*h*, ?*k*) où "*h*" est la hauteur du repère. Techniquement, cette fonction builtIn est codée en Java et retourne la géométrie d'un cercle "*w*" où le rayon décrit la distance horizon calculée à partir de la position de l'amer "*k*" comme suit :  $Rayon = \sqrt{2 * R * h}$  tel que "*R*" défini le rayon terrestre. Cette règle infère donc les coordonnées géographiques 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.

**Règle 2** : visibilité météorologique pour le repère

$$\begin{aligned}
 & NavigationMark(?n) \wedge hasGeometry(?n, ?p) \\
 \wedge & asWKT(?p, ?k) \wedge hasWeatherVisibility(?n, ?l) \\
 \wedge & hasGeometry(?l, ?c) \wedge distance(?l, ?d) \\
 \wedge & WeatherVisibilityDistance(?w, ?d, ?k) \implies asWKT(?c, ?w)
 \end{aligned}$$

Les conditions météorologiques sont caractérisées par leur changement dynamique. Ainsi, il existe des prévisions de la visibilité qui fournissent les informations sur la distance de visibilité à laquelle un objet peut être clairement perçu. Dans cette mesure, la *Règle 2* aboutit à l'inférence des coordonnées géographiques "*w*" en format WKT pour le cercle "*c*". Ce dernier désigne la géométrie de la zone de visibilité "*l*" relative aux conditions météorologiques associée au repère "*n*". Tout comme pour la

définition de la *Règle 1*, nous ajoutons un *builtIn* dans la *Règle 2* 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 "*?c*" dont le centre est défini par la position du repère "*?k*". Cette règle est également appliquée pour chaque amers.

**Règle 3** : visibilité à l'horizon pour le bateau

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

Nous avons rapporté précédemment le fait qu'en plus des conditions assemblées pour une intervisibilité positive, la zone de visibilité à l'horizon pour le bateau doit topologiquement intersecter la zone de visibilité à l'horizon pour le repère. Ainsi, cette *Règle 3* est conçue pour définir les coordonnées géographiques de la zone de visibilité à l'horizon pour le bateau. Cette règle a le même principe que la *Règle 1* avec l'intégration du même *builtIn*, à savoir, *HorizonArea(?w, ?h, ?k)*. Toutefois, nous introduisons le concept *OriginPoint* dans cette règle qui définit la position du bateau et représentera le centre du cercle, à partir duquel la fonction du *builtIn*, calcule le rayon de la distance horizon déterminant ainsi les coordonnées géographiques de la zone de visibilité à l'horizon.

**Règle 4** : intervisibilité entre le bateau et l'amer

$$\begin{aligned} & NavigationMark(?n) \wedge hasGeometry(?n, ?p) \wedge asWKT(?p, ?r) \\ & \wedge hasHeight(?n, ?h) \wedge hasHorizonVisibility(?n, ?l) \\ & \wedge hasGeometry(?l, ?b) \wedge asWKT(?b, ?c) \\ & \wedge hasWeatherVisibility(?n, ?w) \wedge hasGeometry(?w, ?a) \wedge \\ & asWKT(?a, ?f) \\ & \wedge OriginPoint(?o) \wedge hasGeometry(?o, ?g) \wedge asWKT(?g, ?u) \\ & \wedge Vessel(?v) \wedge hasHorizonVisibility(?v, ?t) \\ & \wedge hasGeometry(?t, ?y) \wedge asWKT(?y, ?x) \\ & \wedge VisibleLine(?s) \wedge hasGeometry(?s, ?k) \\ & \wedge sfContains(?k, ?g) \wedge sfContains(?k, ?p) \\ & \wedge IsVisibleLine(?i, ?r, ?c, ?x, ?u, ?f, ?h) \implies VisibilityStm(?s, ?i) \end{aligned}$$

La *Règle 4* stipule qu'une fois les zones de visibilité relatives à l'horizon pour le bateau et pour le repère ainsi que la zone liée aux conditions

météorologiques sont inférées, nous pouvons vérifier si l'amer est visible à partir du bateau par le biais de la notion d'intervisibilité. Plus précisément, le builtIn *IsVisibleLine*(*?i, ?r, ?c, ?x, ?u, ?f, ?h*) est à vrai si le repère "*?n*" ayant les coordonnées géographiques "*?r*", avec une zone de visibilité à l'horizon "*?c*" et une hauteur "*?h*" est visible à partir du bateau "*?v*". Ce dernier, a 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 d'identifier la ligne de visibilité liée à la position du bateau et la position de l'amer en question. La conséquence de cette règle assigne, via la propriété de type de données *VisibilityStm*(*?s, ?i*), un état de visibilité à l'individu "*?s*" de type *VisibleLine*. 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*".

Comme méthode, le builtIn *IsVisibleLine*(*?i, ?r, ?c, ?x, ?u, ?f, ?h*) retourne la valeur "*true*" si les conditions en dessous sont satisfaites dans l'ordre :

- I ) Les deux zones de visibilité à l'horizon pour le bateau et pour l'amer doivent être en intersection topologique.
- II ) La localisation du bateau doit être topologiquement dans la zone de visibilité définie par les conditions météorologiques, quand celle-ci n'est pas définie à la distance horizon par les services météorologiques.
- III ) En considérant la zone délimitée par la ligne de visibilité, aucune élévation d'un obstacle sur la ligne ne doit excéder l'élévation de la ligne de mire.

## 3.4 Cas d'étude

Dans cette partie, nous présentons un exemple qui souligne l'inférence par le biais de ces règles SWRL dans un cas d'utilisation. En vue d'expliquer au mieux ce cas d'utilisation, nous présentons d'abord l'architecture générale qui nous a permis, techniquement, de tester nos règles pour l'extension sémantique du modèle ontologique.

### 3.4.1 Architecture modulaire avec le système d'inférence

L'ontologie que nous avons déployée est définie en OWL avec un ensemble d'axiomes décrit en DL (la syntaxe Manchester OWL) et des règles SWRL.

Il existe différents frameworks qui permettent de traiter les ontologies dans une application telle que celle développée dans nos travaux. Nous citons le framework de l'API Jena qui est largement utilisé et fournit une abstraction fondée sur les triplets RDF. Notre ontologie est fondée essentiellement sur des axiomes, il serait alors plus pertinent d'opter pour une autre API qui traite l'ontologie à un niveau d'abstraction axiomatique. Dans cette mesure, nous avons choisi l'API OWL qui constitue un ensemble d'interface pour inspecter, manipuler et raisonner des ontologies décrites avec OWL. Cette API ne se limite pas au niveau RDF pour représenter les expressions des classes et des axiomes. L'ontologie est de ce fait vue comme un ensemble d'annotations et d'axiomes. L'objectif clé de travailler avec les ontologies en OWL est l'application du mécanisme qui nous servira à déduire les différents composants de la trajectoire.

L'utilisation d'une ontologie requière avant tout la vérification de sa consistance. Les raisonneurs jouent un rôle important dans ce cadre. Ils permettent de vérifier s'il existe des contradictions ou des classes insatisfiables dans l'ontologie. De plus, un raisonneur donne la possibilité de déduire les hiérarchies des concepts et des relations. L'interface *OWLReasoner* fournie par l'API OWL permet une interaction avec différents raisonneurs déjà développés. L'interface offre aussi la fonctionnalité d'un raisonnement incrémental qui nous aide à utiliser le résultat d'une règle ou d'un axiome pour générer d'autres inférences.

Plusieurs raisonneurs sont à la disposition des utilisateurs (CEL, FaCT++, HermiT, Pellet, etc.) afin de déployer un système fondé sur les inférences. Nous avons opté pour le raisonneur *Pellet* car dans notre architecture modulaire, nous combinons une inférence à niveau axiomatique (DL) avec des règles définies en SWRL et qui emploient des *builtIns* – comme expliqué dans les définitions de nos règles –. Ce Raisonneur semblait le plus performant pour gérer ce mécanisme d'inférence avec un support de requête orienté DL.

Dans notre application et l'utilisation de l'ontologie, effectuer des requêtes sur les données instanciées ou inférées est nécessaire. Dans la technologie du web sémantique, le langage d'interrogation est souvent orienté RDF d'où l'utilisation de SPARQL. Or l'ontologie déployée dans notre module applicatif est orientée DL. Ceci représente un inconvénient majeur dans l'utilisation du langage de requêtes SPARQL. Néanmoins, une alternative, est d'utiliser SPARQL-DL qui représente des atouts dans l'inférence des sous-concepts strictes et directs d'un concept donné dans

l'ontologie.

La Figure 3.6 illustre l'architecture déployée. La base de connaissances est peuplée dans un premier temps automatiquement par les données provenant du SHOM ensuite des rectifications manuelles sont effectuées pour pallier l'absence de quelques informations telles que la hauteur et le nom des repères ainsi que la distance de visibilité.

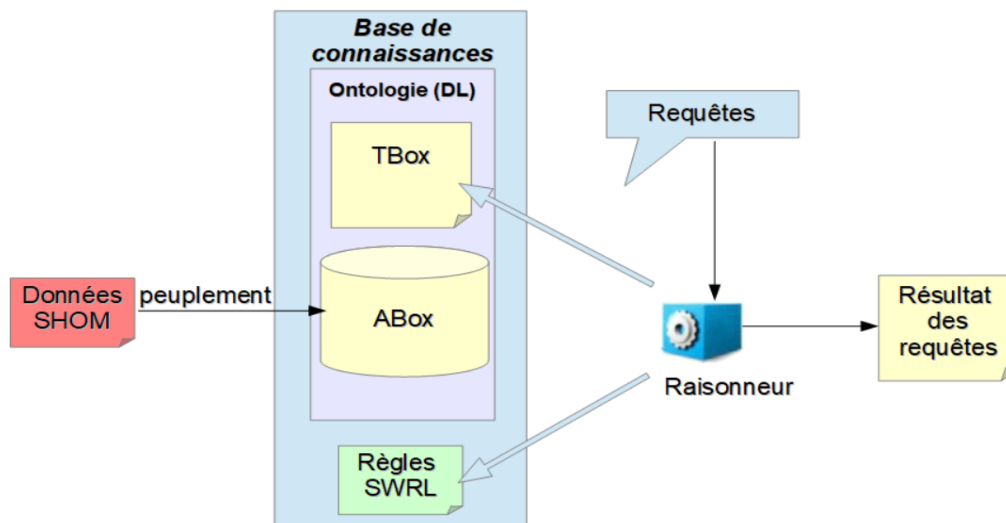


FIGURE 3.6 – Vue globale de l'architecture applicative

### 3.4.2 Résultat du raisonnement

L'ontologie est peuplée avec les mêmes instances énoncées dans le chapitre précédent mais aussi avec quelques enrichissements qui coïncident avec les nouveaux concepts ajoutés à l'ontologie. Plus précisément, nous ajoutons pour chaque repère un individu représentant sa zone de visibilité dont la valeur des coordonnées géographiques est inférée. En outre, nous formons des lignes entre le point *OriginPoint* d'où se teste la visibilité d'un amer et le point qui représente la géométrie de ce repère. Une fois cette première étape établie, nous procédons au test des inférences. Il est important de rappeler que les règles SWRL, qui sont des DL-Safe, ne peuvent s'appliquer explicitement que sur les individus existants dans la base de connaissances. Nous décrivons ci-dessous, l'application des règles qui permettent de vérifier si le repère « *Pointe du Petit Minou* » est visible à partir d'un Point de départ qui est le « *Port de Brest* ». Nous nous appuyons sur des Tables 3.1, 3.2, 3.3 et

3.4 afin de montrer les instanciations qui satisfont les conditions des Règles SWRL.

### Application de la Règle 1

| Conditions de la règle               | Individus dans l'ontologie             |
|--------------------------------------|----------------------------------------|
| <i>NavigationMark</i> (?n)           | ?n = <i>Pointe du Petit Minou</i>      |
| <i>hasGeometry</i> (?n, ?p)          | ?p = <i>Point354</i>                   |
| <i>asWKT</i> (?p, ?k)                | ?k = POINT(-4.6142 48.336599999999997) |
| <i>hasHeight</i> (?n, ?h)            | ?h = 34.0                              |
| <i>hasHorizonVisibility</i> (?n, ?l) | ?l = <i>H1</i>                         |
| <i>hasGeometry</i> (?l, ?c)          | ?c = <i>C1</i>                         |

TABLE 3.1 – Satisfaisabilité des conditions de la Règle 1

En prenant exemple avec le repère « *Pointe du Petit Minou* », les conditions de la Règle 1 sont satisfaisables avec l'ajout des individus *VHorizon*(*H1*) et *Geometry*(*C1*) ainsi que des relations qui les associent tel que le montre la Table 3.1. Le builtIn *HorizonArea*(?w, 34, POINT(-4.6142 48.336599999999997)) est alors appliqué et dont le retour de la méthode est stockée dans la variable ?w. Une fois que la satisfaisabilité du corps de la règle est validée, le raisonneur infère la conséquence de la règle et génère le format WKT de la géométrie *C1* qui n'est autre que ?w.

### Application de la Règle 2

Tout comme l'application de la Règle 1 sur l'amer *Pointe du Petit Minou*, l'application de la Règle 2 sur le même amer, implique la nécessité de satisfaire les conditions citées dans la Table 3.2. Étant donné que les règles SWRL sont DL-Safe, les variables dans la conséquence doivent se trouver dans le corps de la règle. Il est alors indispensable d'instancier dans l'ontologie l'individu qui décrit le concept (*VWeather*) de visibilité relatif aux conditions météorologiques pour chaque amer. Dans le cas de cet exemple, le repère « *Pointe du Petit Minou* » est associé à l'individu *W1* par la relation *hasWeatherVisibility*. La distance identifiée dans les conditions de la règle, correspond à la distance de visibilité fournie par les services météorologiques. Il est à noter que cette distance est la même pour chaque amer. Ce qui change

| Conditions de la règle               | Individus dans l'ontologie             |
|--------------------------------------|----------------------------------------|
| <i>NavigationMark</i> (?n)           | ?n = <i>Pointe du Petit Minou</i>      |
| <i>hasGeometry</i> (?n, ?p)          | ?p = <i>Point354</i>                   |
| <i>asWKT</i> (?p, ?k)                | ?k = POINT(-4.6142 48.336599999999997) |
| <i>hasWeatherVisibility</i> (?n, ?l) | ?l = <i>W1</i>                         |
| <i>hasGeometry</i> (?l, ?c)          | ?c = <i>C54</i>                        |
| <i>distance</i> (?l, ?d)             | ?d = 8046.72                           |

TABLE 3.2 – Satisfaisabilité des conditions de la *Règle 2*

ce sont les coordonnées géographiques de la zone de visibilité propre à chaque repère. Ces coordonnées géographiques représentent le résultat de cette règle qui l'associe à la géométrie *C54* (Table 3.2). Ceci, après l'exécution du builtIn *WeatherVisibilityDistance*(?w, ?d, ?k).

### Application de la Règle 3

| Conditions de la règle               | Individus dans l'ontologie                |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| <i>Vessel</i> (?b)                   | ?b = <i>Vessel1</i>                       |
| <i>OriginPoint</i> (?o)              | ?o = <i>Port de Brest</i>                 |
| <i>hasGeometry</i> (?o, ?p)          | ?k = POINT(-4.535528333333334 48.3501655) |
| <i>hasHeight</i> (?b, ?h)            | ?l = 15.0                                 |
| <i>hasHorizonVisibility</i> (?b, ?l) | ?l = <i>H2</i>                            |
| <i>hasGeometry</i> (?l, ?c)          | ?c = <i>C3</i>                            |

TABLE 3.3 – Satisfaisabilité des conditions de la *Règle 3*

L'exécution de la *Règle 3* est effectuée par le raisonneur quand le concept *Vessel* est instancié dans l'ontologie. Ensuite, la validité des autres conditions est vérifiée. Dans l'exemple (Table 3.3), la base de connaissances est peuplée avec un individu de type *Vessel* qui a une valeur représentant la hauteur d'où se fait la perception. Cette valeur est décrite par la propriété de type de données *hasHeight* (Table 3.3). La perspective de cette règle est de déduire

| Conditions de la règle               | Individus dans l'ontologie                |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| <i>NavigationMark</i> (?n)           | ?n = <i>Pointe du Petit Minou</i>         |
| <i>hasGeometry</i> (?n, ?p)          | ?p = <i>Point354</i>                      |
| <i>asWKT</i> (?p, ?r)                | ?r = POINT(-4.6142 48.336599999999997)    |
| <i>hasHeight</i> (?n, ?h)            | ?h = 34.0                                 |
| <i>hasHorizonVisibility</i> (?n, ?l) | ?l = <i>H1</i>                            |
| <i>hasGeometry</i> (?l, ?b)          | ?b = <i>C1</i>                            |
| <i>asWKT</i> (?b, ?c)                | ?c = Conséquence de la <i>Règle 1</i>     |
| <i>hasWeatherVisibility</i> (?n, ?w) | ?w = <i>W1</i>                            |
| <i>hasGeometry</i> (?w, ?a)          | ?a = <i>C54</i>                           |
| <i>asWKT</i> (?a, ?f)                | ?f = Conséquence de la <i>Règle 2</i>     |
| <i>OriginPoint</i> (?o)              | ?o = <i>Port de Brest</i>                 |
| <i>hasGeometry</i> (?o, ?g)          | ?g = <i>PointA</i>                        |
| <i>asWKT</i> (?g, ?u)                | ?u = POINT(-4.535528333333334 48.3501655) |
| <i>Vessel</i> (?v)                   | ?v = <i>Vessel1</i>                       |
| <i>hasHorizonVisibility</i> (?v, ?t) | ?t = <i>H2</i>                            |
| <i>hasGeometry</i> (?t, ?y)          | ?y = <i>C3</i>                            |
| <i>asWKT</i> (?y, ?x)                | ?x = Conséquence de la <i>Règle 3</i>     |
| <i>VisibleLine</i> (?s)              | ?s = <i>VisibleLinePointAPoint354</i>     |
| <i>hasGeometry</i> (?s, ?k)          | ?k = <i>lPointAPoint354</i>               |

TABLE 3.4 – Satisfaisabilité des conditions de la *Règle 4*

la zone de visibilité à l'horizon à partir du bateau. Ceci permettra la satisfaisabilité de l'une des prémisses de la *Règle 4*. Le raisonneur validera toutes les conditions de la présente règle car les variables ont toutes été interprétées par une valeur à partir de la base de connaissances avec l'application du même *builtIn* énoncé dans la *Règle 1*.

#### Application de la Règle 4

La conséquence de cette règle démontre la validité de la ligne de visibilité formée par le repère et le point de départ – appelé *Port de Brest* dans l'ontologie et qui est considéré par inférence axiomatique comme de type *OriginPoint*–. Pour ce faire, les conditions dans le corps de la règle sont satisfiables dans la mesure où le raisonneur a pu faire une correspondance entre chaque variable et un individu dans la base de connaissances (Table

3.4). Dans cette règle, nous constatons l'utilisation de la stratégie de chaînage arrière qui va chercher la règle qui infère la conséquence utilisée dans le corps de la règle courante. À titre d'exemple (Table 3.4), la variable  $?f$  est instanciée par la conséquence de la *Règle 2*. Le builtIn déployé dans cette règle (*IsVisibleLine*), prend en compte l'élévation fournie par l'API Elevation de Google Maps. Cette API fournit la ligne d'élévation topographique définie par le point de départ qui est le « *Port de Brest* », et le repère « *Pointe du Petit Minou* ». La méthode du builtIn vérifie que les élévations retournées par l'API Elevation de Google Maps et situées sur la ligne topographique n'excède pas l'élévation de la ligne de mire – calculée également dans le builtIn—. Dans notre cas d'utilisation, l'amer est bien visible à partir du point d'origine (*Port de Brest*) et un état de vérité *true* est ajouté à l'individu *VisibleLinePointAPoint354*.

Nous illustrons dans la Figure 3.7, les zones de visibilité inférées par le raisonneur en prenant pour exemple l'application de la *Règle 1* et la *Règle 2* sur la *Pointe du Petit Minou*. Le cercle (A) représente la zone de visibilité relative aux conditions météorologiques (*Règle 2*). Quant au cercle (B), il décrit la zone de visibilité à l'horizon pour le même amer (*Règle 1*). La ligne  $[P1, P2]$  représente une ligne de visibilité formée par un point d'origine  $P1$  et le repère  $P2$ . La *Règle 4* infère l'état vrai pour cette ligne car en plus de la satisfaisabilité des deux conditions I et II (définies pour le builtIn dans la *Règle 4*), la ligne topographique (Figure 3.8) ne dépasse pas pas la ligne d'intervisibilité simple –formée entre le bateau et le repère–.

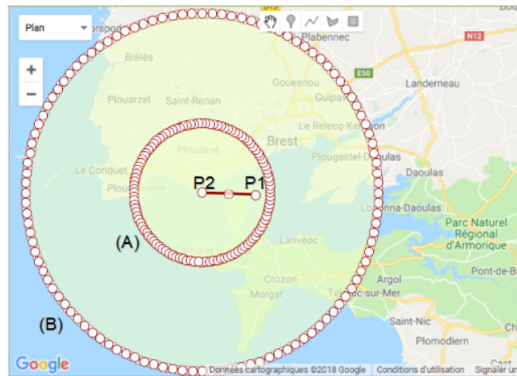


FIGURE 3.7 – Zones de visibilité inférées pour l'amer "Point du petit Minou"<sup>1</sup>

1. Le web service <http://arthur-e.github.io/Wicket/> a été utilisé pour afficher les zones et une ligne de visibilité.

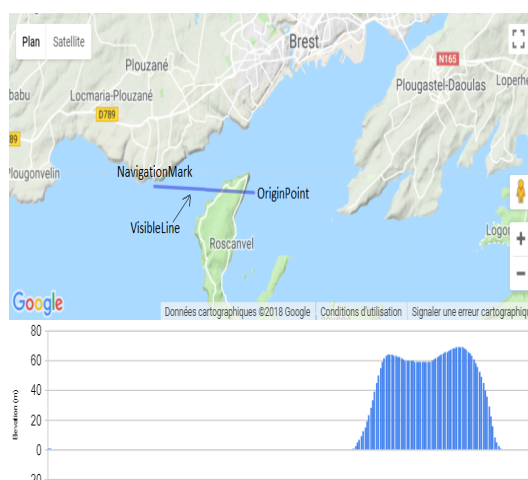


FIGURE 3.8 – Ligne topographique au niveau de la ligne de visibilité (API Elevation de Google Maps)

### 3.5 Conclusion

L'enrichissement de l'ontologie décrit dans ce chapitre permet de prendre en charge l'aspect de visibilité. Ceci dans la perspective de sélectionner un repère parmi plusieurs dans une base de connaissances. Cet enrichissement comprend en partie l'ajout de nouveaux concepts mais aussi l'addition des règles SWRL dans la base de connaissances. Les étapes de l'enrichissement conceptuel sont fondées sur le même principe que la conceptualisation élémentaire présentée dans la chapitre précédent. Autrement dit, nous avons d'abord procédé à l'analyse graphique des éléments associés à la vérification de la perception d'un repère. Cependant, comme OWL ne permet pas certaines inférences – pour ajouter une nouvelle sémantique à la base de connaissances et de nouvelles informations –, des règles SWRL ont été définies dans ce sens, afin de combler cet inconvénient. Ainsi dans ce chapitre, quatre règles sont présentées : deux règles pour déduire la zone de visibilité à l'horizon (le repère et le bateau), une règle pour la visibilité liée aux conditions météorologiques et une règle liée à la vérification de l'amer en tenant compte des autres règles et du principe de l'intervisibilité simple.

Nous avons évoqué dans ce chapitre l'influence temporelle sur la sélection des repères notamment la différence distinguée en navigation de nuit et de jour. Cette temporalité cyclique peut très bien être ajoutée dans le modèle avec la modélisation des concepts adéquats mais aussi des règles

| Individus/Concepts/Propriétés<br>de type de données(PTD) | Instanciations | Inférences |
|----------------------------------------------------------|----------------|------------|
| NavigationMark                                           | ✓              |            |
| OriginPoint                                              | ✓              |            |
| VisibleLine                                              | ✓              |            |
| Light                                                    | ✓              |            |
| Heigh(PTD)                                               | ✓              |            |
| distance (PTD pour VWeather)                             | ✓              |            |
| distance (PTD pour VHorizon)                             |                | ✓          |
| asWKT (PTD pour VWeather)                                |                | ✓          |
| asWKT (PTD pour VHorizon)                                |                | ✓          |
| VisibilityStm (PTD pour Visible-<br>Line)                |                | ✓          |

TABLE 3.5 – Instanciations vs. inférences via l’ontologie pour le wayfinding en milieu maritime

qui permettent d’inférer les secteurs circulaires de la portée du feu. Il suffit par la suite d’ajouter la dimension temporelle dans le filtrage des lignes de visibilité (en plus de leur état inféré dans la Règle 4) qui représenteront éventuellement les routes à suivre. De plus, la Règle 4 devrait également intégrer cette dimension afin de l’interpréter dans le builtIn pour inférer l’état de visibilité en tenant compte de la navigation de nuit ou de jour. Une autre Règle doit aussi être définie afin d’appliquer l’intervisibilité sur les objets de type *Light*. Cette proposition de l’intégration de la dimension temporelle est une perspective a court terme dans nos travaux.

La Table 3.5 résume les instanciations effectuées dans l’ontologie et les inférences suite à l’enrichissement abordé dans ce chapitre. Le prochain chapitre fera l’objet d’une combinaison entre ces inférences et un algorithme de routage. Ce qui permettra de générer davantage d’informations, notamment les points de décision qui contribuent à la génération de la trajectoire.



# Chapitre 4

## Algorithmes pour la génération des points de décision

”On arrive toujours au bout, les chemins seuls sont différents”

---

Anne Barratin

### 4.1 Introduction

La conclusion du chapitre 1 énonce que certains éléments du wayfinding extraits par Lynch font référence aux éléments d'un graphe. Nous avons projeté cette constatation sur notre problématique et nous en avons conclu que pour trouver une ou plusieurs trajectoires dans l'environnement maritime côtier – espace ouvert –, il faut d'abord construire ces éléments dans le contexte d'une navigation maritime. Ces éléments correspondent principalement aux *routes* qui sont une partie des *lignes de visibilité* et à des *points de décision* qui désignent l'intersection des lignes de visibilité. A partir du cas d'utilisation étudié dans le premier chapitre, nous avons montré que dans l'optique d'inférer une trajectoire, il fallait tout d'abord peupler l'ontologie avec des lignes de visibilité (*visibleLine*) et des points de décisions (*DecisionPoint*). Dans le chapitre précédent, la méthode sur comment procéder pour effectuer la génération d'une ligne de visibilité à partir d'un point (*OriginPoint*) a été abordée. Dans ce chapitre, nous proposons une approche automatique fondée sur des algorithmes qui permet de générer les points de décision établis à partir de l'intersection de lignes de visibilité. Cependant, pour atteindre une destination, le bateau passe par plusieurs points de décision qui doivent être définis au fur et mesure de l'avancée de la trajectoire.

Ceci génère la problématique de la génération des lignes de visibilité possibles en considérant différents « OriginPoints » sur l’environnement entre le point de départ et le point d’arrivée. Nous expliciterons en premier lieu cette problématique qui donnera suite à une approche pour générer les lignes de visibilité et les points de décision qui sont les fondements d’un graphe exploitable pour d’autres perspectives. Dans notre cas, ces générations permettront le peuplement d’une ontologie axiomatique pour la déduction d’éventuelles trajectoires. Notons qu’une approche semi-automatique aurait aussi été possible. Dans ce cas, un utilisateur choisirait (de façon interactive) les points de décision qui composent sa trajectoire. Cette option est généralement proposée dans les logiciels de navigation maritime. Nous avons choisi d’écarter cette seconde approche afin de privilégier une approche automatique plus complexe à traiter.

## 4.2 Définition de la problématique

La génération d’itinéraire dans un espace ouvert est une problématique qui a déjà été abordée dans le domaine de la robotique. Considérant les travaux de Nilsson (1969), où il développe un algorithme pour la planification de routes pour un robot, la perception est prise en compte afin d’éviter les obstacles. Dans notre étude, il est aussi important d’intégrer la perception et les obstacles. En reprenant la Figure 1, qui résume le concept de way-finding en milieu maritime côtier tout en incluant les lignes de visibilité, nous distinguons – comme l’illustre la Figure 4.1 – que ces lignes peuvent former un graphe dont les sommets représentent les points de décision et les arêtes les lignes de visibilité. Ces dernières définissent un relèvement ou un alignement sur les repères. Dans la littérature de la théorie des graphes, cette problématique nous rappelle la thématique des graphes de visibilité comme dans les travaux de De Florian et al. (1994). Ces graphes sont définis généralement pour générer des chemins en évitant les obstacles et en maintenant une visibilité entre deux points adjacents. Ainsi, nous suivrons la même démarche et notre but sera de définir ce graphe. Pour ce faire, il est nécessaire de s’appuyer sur le monde réel qui entoure l’environnement maritime et de prendre en compte les obstacles. Nous utiliserons donc notre modèle ontologique afin de construire ce graphe. Il est à noter que dans notre cas d’étude, nous n’exploitons pas le graphe dans le but de trouver un chemin optimal pour une navigation mais pour générer les intersections entre les lignes de visibilité. Ces intersections répondent à la question : à partir de quel endroit dans la trajectoire est-il possible qu’un amer soit visible afin de changer de cap ?

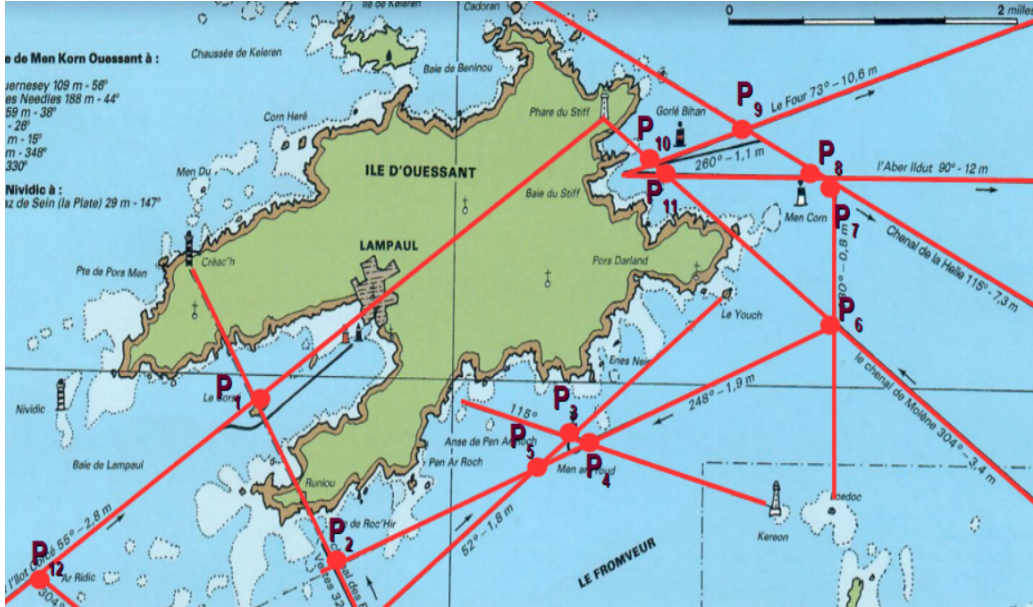


FIGURE 4.1 – Des lignes de visibilité au graphe de visibilité

### 4.3 Graphe de visibilité

Dans un graphe de visibilité, les localisations dans l'environnement sont reliées si elles sont mutuellement visibles. La littérature montre que ce concept a été développé par les sciences de l'information géographique, notamment dans un cadre de pathfinding et ainsi dans la recherche du plus court chemin, ceci par le biais des communications entre les lignes de mire. En géométrie computationnelle et plus précisément dans le domaine de la robotique, la notion de graphe de visibilité n'y est pas inconnu. Dans ce contexte, nous trouvons l'étude de la navigation d'un robot entre des polygones qui représentent des obstacles (de Berg et al., 1997). Les sommets de ces polygones décrivent alors les sommets du graphe de visibilité s'ils sont mutuellement visible. Les propriétés géométriques de l'environnement influencent la définition de ce graphe qui est dérivé d'un ensemble de points aléatoires. Dans ce qui suit, nous déterminons en détails le concept des graphes de visibilité d'une manière générale pour ensuite nous projeter ce même concept dans notre contexte.

## 4.4 Terminologies et définitions

Nous introduisons ici, la terminologie standard des graphes.  $G$  dénote un graphe constitué de deux ensembles  $V$  et  $E$ . L'association entre le graphe et les deux ensembles est désignée par  $G(V, E)$  où  $V(G)$  représente l'ensemble des sommets tel que  $V = v_1, \dots, v_n$  et  $E(G)$  dénote les arêtes existantes entre les nœuds (sommets). Ces arêtes peuvent être dénotées par une paire de sommets  $(v_i, v_j)$  ou bien  $e_{ij}$ . Dans le cas d'un graphe non orienté, l'ordre des paires n'est pas important. Ainsi,  $e_{ij} \equiv e_{ji}$ . Une paire  $v_i, v_j$  ou  $e_{ij}$  existe dans le graphe si  $v_i$  est visible à partir de  $v_j$  (ou vice-versa).

Les travaux relatifs à la construction des graphes de visibilité a fait émerger certaines définitions pour le raffinement de la visibilité mutuelle entre deux points. Deux sommets  $v_i$  et  $v_j$  sont mutuellement visibles si le segment  $[v_i, v_j]$  ne contient pas d'autres sommets  $v_k$ . Ainsi,  $[v_i, v_j] \cap V = \{v_i, v_j\}$ . En revanche, si un nœud  $v_k$  existe, il annulerait cette visibilité. De plus, la présence d'un obstacle entre deux points adjacents, annulera également la visibilité. Plusieurs typologies de graphes de visibilité existent. Nous citons les graphes de visibilité à partir des segments ou dans un polygone. Pour les graphes de visibilité suivant des segments – formés par deux nœuds –, deux sommets  $v_i$  et  $v_j$  appartenant à deux segments différents sont mutuellement visibles si l'arête  $e_{ij}$  n'intersecte aucun autre segment défini dans l'espace. Le graphe de visibilité dans un polygone spécifie qu'un sommet  $v_i$  du polygone est mutuellement visible avec un autre sommet  $v_j$  si  $[v_i, v_j]$  est à l'intérieur du polygone. Autrement dit,  $[v_i, v_j]$  est valide dans le graphe de visibilité si ce segment n'a aucun point d'intersection avec l'extérieur du polygone (cf. (Ghosh and Goswami, 2013) pour plus de détails).

La planification des routes pour les robots s'appuie aussi sur les graphes de visibilité pour trouver par exemple, le plus court chemin dans un environnement parsemé d'obstacles. Ainsi, la construction du graphe de visibilité est influencée par cet ensemble d'obstacles qui sont géométriquement des polygones. Les sommets de ces derniers représentent les sommets du graphe en plus des points de départ et d'arrivée. Une arête est validée entre deux sommets  $v_i$  et  $v_j$  s'il existe une visibilité mutuelle. Cette visibilité est valide si le segment  $[v_i, v_j]$  n'est pas en intersection avec l'intérieur des polygones obstacles. Les segments formant ces polygones obstacles font partie de  $E(G)$ . Ainsi, les deux sommets  $v_i$  et  $v_j$  formant un segment dans un polygone obstacle sont mutuellement visible. Pour générer le graphe, il faut tester pour chaque sommet sa visibilité mutuelle avec les autres sommets du graphe. Plusieurs algorithmes ont été établis pour cette perspective (plus de détails

dans (de Berg et al., 1997)). Nous noterons que dans la littérature, l'ensemble  $V(G)$  est connu avant de tester la visibilité mutuelle et procéder à la construction du graphe. Nous verrons dans ce qui suit, comment projeter ces études sur notre propre contexte.

## 4.5 Graphe de visibilité dans le contexte maritime côtier

Notre objectif n'étant pas de trouver le plus court chemin mais les chemins possibles suivant les repères visible, le graphe de visibilité peut être exploité différemment. En effet, comme nous le constatons sur la Figure 4.1, les points de décision représentent les résultats d'intersection d'au moins deux lignes de visibilité. Nous proposons alors de définir les points de décision à travers la construction d'un graphe de visibilité.

### 4.5.1 Propriétés du graphe de visibilité

Le principe de visibilité est fondamental pour la construction d'un graphe de visibilité et ceci dans n'importe quel environnement. Dans notre contexte, cette notion est étudiée afin de sélectionner les repères qui sont visibles à partir d'une localisation dans l'environnement. Deux points sont importants dans la formalisation de ce principe de visibilité. Le premier est le point d'où se fait l'observation et le deuxième illustre le repère. Suivant le procédé de sélection des repères, tel que vu dans le chapitre précédent, nous dirons dans un premier temps, que les *repères* et les points d'observation (représentés dans le modèle par le concept *OriginPoint*), sont les sommets du graphe. Ainsi, si la visibilité est vérifiée entre les deux points, c'est-à-dire que le repère est visible à partir d'un *OriginPoint*, alors les deux sommets sont mutuellement visibles. Ceci forme la ligne de visibilité.

Dans la Figure 4.1, si on considère les sommets  $S = P_4, phare de Kéréon$ , le segment les reliant fait partie des arêtes du graphe car d'après les informations figurant sur la carte, le phare Kéréon est visible à partir de  $P_4$  – une ligne de relèvement est tracée –. En Supposant que le point de départ de la trajectoire est le Point  $P_2$  et que le Point d'arrivée est  $P_9$ , la trajectoire éventuelle à suivre serait la ligne polygonale  $T = \{P_2, P_4, P_6, P_7, P_9\}$  – d'autres trajectoires existent –. Dans la pratique, les positions des repères ne font pas partie des points de la trajectoire. Théoriquement dans le contexte des graphes, les sommets associés aux repères ne feront donc pas partie du graphe de visibilité qui sera exploité pour la génération des trajectoires

possibles. Cette constatation vient annuler l'une des propriété énoncée habituellement dans la construction des graphes de visibilité et qui stipule que si deux sommets sont visibles mutuellement alors ces sommets feront partie du graphe exploitable. Ce dernier sera donc un sous-graphe du graphe de visibilité principal où les repères sont considérés comme des sommets pour vérifier l'intervisibilité avec des **OriginPoint**. Les arêtes du sous-graphe sont géométriquement des segments faisant partie des segments du graphe principal.

Une autre propriété des graphes de visibilité n'est pas applicable dans notre contexte. Si par exemple nous analysons le segment  $[P_2P_6]$ , il existe deux autres sommet sur ce segment qui sont  $P_4$  et  $P_5$ . Ainsi, la propriété  $[v_i v_j] \cap V = \{v_i, v_j\}$  ne s'applique pas dans le graphe que nous voulons générer. Cependant, la propriété qui prend en compte l'intersection avec l'intérieur d'un polygone obstacle est applicable. Autrement dit si un obstacle existe entre deux sommets alors le segment qui les relie n'est pas considéré dans le calcul du chemin même si les deux sommets sont mutuellement visibles. Dans la trajectoire maritime côtière, cette contrainte spatiale est appliquée également car s'il y a un obstacle entre deux éventuels points de décision, la trajectoire est déviée. Dans le cas du graphe de la Figure 4.1, le segment  $[P_1P_2]$  s'annule car il y a un obstacle spatial entre les deux sommets.

En conclusion, les propriétés du graphe principal et du sous-graphe que nous visons à générer se résument dans ce qui suit :

- **Propriété 1** : les sommets du graphe principal doivent être mutuellement visible en appliquant le principe de la génération des **lignes de visibilité**, entre les **repères** et un **OriginPoint**, tel que défini dans le chapitre 3.
- **Propriété 2** : l'ensemble des points d'intersection des lignes de visibilité représente les sommets du sous-graphe à exploiter et sont associés à des **points de décision**.
- **Propriété 3** : un segment du sous-graphe est un sous segment du graphe principal et représente éventuellement une **route** de la **trajectoire**.
- **Propriété 4** : un segment du sous-graphe est formé par **deux points de décision** ou un **point de départ** et un **point de décision** ou encore un **point de décision** et **point d'arrivée**.

- **Propriété 5** : un segment du sous-graphe ne doit pas intersecter un obstacle, représentant dans le monde réel une zone terrestre.

Nous allons maintenant définir ces propriétés dans un formalisme relatif aux graphes, en utilisant les définitions des concepts d'une trajectoire maritime.

### 4.5.2 Formalisation des propriétés

Soit  $V_{init}$  l'ensemble des repères et des « OriginPoint » (représente soit la localisation du bateau soit la position d'où se fait l'observation) et soit  $E_{init}$  l'ensemble des lignes de visibilité ayant un état de visibilité= $\{true\}$ . Ces lignes qui sont déduites de l'application des règles SWRL définis précédemment. Ces deux ensembles forment le graphe de visibilité principal  $G_{init}(E_{init}, V_{init})$ , avec  $V_{init} = \{OriginPoint(x_i), NavigationMarks(y_j)\}$  et  $E_{init} = \{[x_i, y_j], \text{ tq } VisibilityStm([x_i, y_j], \{true\})\}$ . Pour rappel,  $VisibilityStm$  est une relation désignant l'état de visibilité entre deux points. Elle stipule que le segment formé par les deux points est à l'état  $true$  si la visibilité de  $NavigationMarks(y_j)$  est vérifiée à partir de  $OriginPoint(x_i)$ .

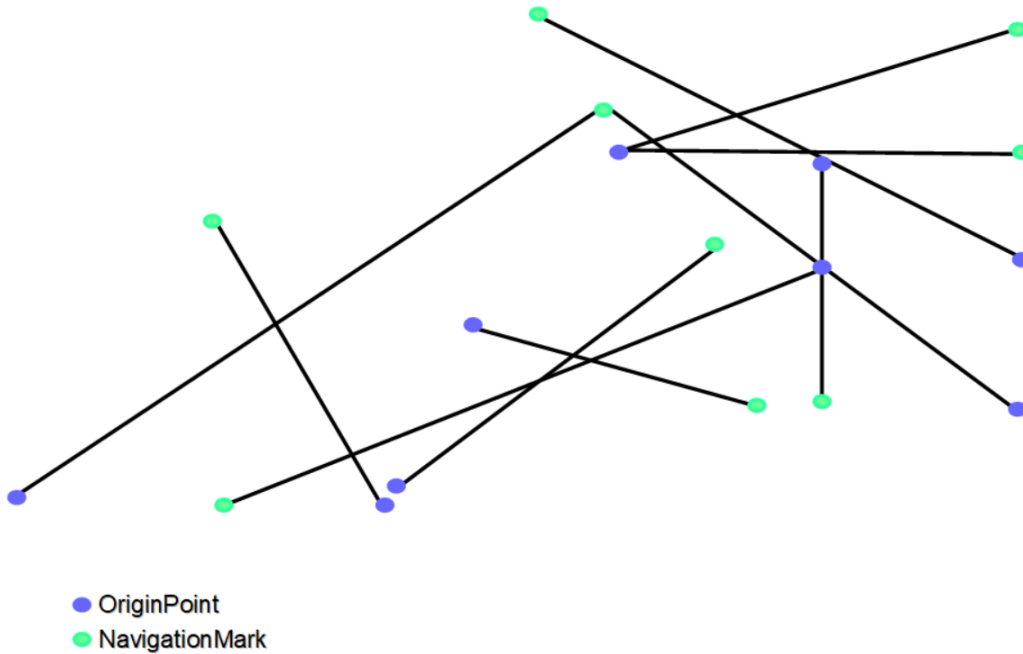


FIGURE 4.2 – Graphe de visibilité principal

Nous avons montré que le graphe à exploiter pour générer les points de décision possibles est le sous-graphe de  $G_{init}$ . Cependant, bien que les arêtes du sous-graphe appartiennent géométriquement aux arêtes du graphe principal, l'ensemble des sommets les définissant ne contient aucun repère et regroupe les points de décision qui ne font pas partie des sommets du graphe principal. Soit  $G_{Sinit}$  ce sous-graphe défini par  $G_{Sinit}(E_{Sinit}, V_{Sinit})$ . Avec  $V_{Sinit}$  l'ensemble des sommets défini par  $V_{Sinit} = \{DeparturePoint(P_i), DestinationPoint(P_j), DecisionPoint(P_k)\}$ , tel que les points de décision sont à l'intersection de plusieurs arêtes (appartiennent à plusieurs) c.-à-d.  $DecisionPoint(P_k) = \{\bigcap_{r=0}^n E_{init,r}\}$ . L'ensemble des arêtes  $E_{Sinit}$  est défini comme suit :  $E_{Sinit} = \{[WayPoint(P_i)WayPoint(P_j)] \text{ tq } \exists e_k \in E_{init} \wedge WayPoint(P_i) \in e_k \wedge WayPoint(P_j) \in e_k\}$  avec  $WayPoint(P_i) = \{DeparturePoint(P_i), DestinationPoint(P_i), DecisionPoint(P_i)\}$ .

La Figure 4.2 illustre le graphe de visibilité principal en considérant certains repères relatifs à la navigation côtière de l'île d'Ouessant. En prenant en compte la formalisation énoncée ci-dessus, nous obtiendrons à partir du graphe de visibilité principal le sous-graphe de visibilité illustré dans la Figure 4.3. Ces deux graphes sont dérivées à partir de la Figure 4.1. Nous remarquons donc que la *Propriété 5* n'est pas appliquée pour le moment dans le sous-graphe car le segment  $[P1, P2]$  est maintenu. Cela est dû au fait qu'il faut introduire d'autres concepts qui enrichissent la dimension spatiale de l'environnement. Comme nous l'avons introduit dans la problématique, nous devons définir le graphe de la trajectoire en nous servant du modèle ontologique.

## 4.6 Enrichissement de l'ontologie

### 4.6.1 Dimension spatiale environnementale

Jusqu'ici, notre modèle ontologique ne prenait pas en compte toutes les contraintes spatiales. En ne considérant que les repères ou les feux dans notre modèle, les concepts définis pour la trajectoire ne sont pas suffisants pour générer les routes. En pratique, un marin ne peut pas ignorer les obstacles se trouvant sur une route. Cette contrainte est identifiée par la **Propriété 5** qui stipule qu'un segment donné appartient au sous-graphe si aucune intersection n'existe avec un obstacle. Afin de définir formellement cette contrainte, nous devons initialement définir ce qu'est qu'un obstacle. Dans les cartes électroniques de navigation (ENC), les données au format S57 fournissent

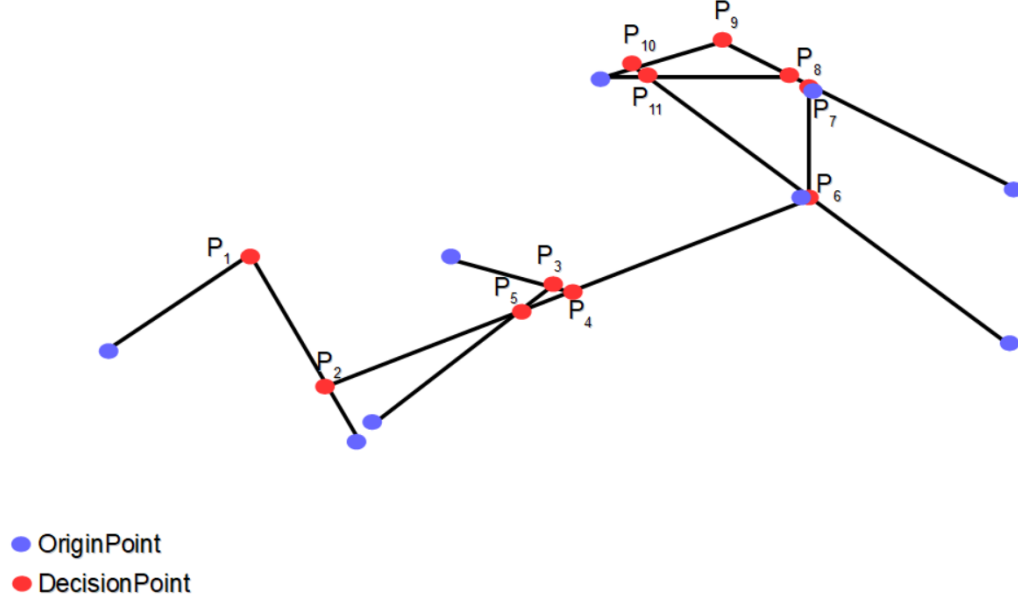


FIGURE 4.3 – Sous-graphe de visibilité exploitable pour une trajectoire

des connaissances utiles pour ce but. Parmi les objets figurant dans le catalogue qui définit les informations de la carte, nous trouvons les objets Land Area et Sea Area. Ces deux derniers permettent de délimiter la zone de navigation (Sea Area) est d'éviter les obstacles terrestres définis par Land Area. Ils ont également différentes géométries telles que des polygones et des polygones. Ainsi, ils sont facilement intégrables dans l'ontologie que nous avons modélisée car ils ont l'attribut géométrie sur lequel est fondé notre modèle. La classe Feature englobera donc en plus des concepts définis initialement, les deux concepts **LandArea** et **SeaArea**. Ces deux concepts seront associés à la classe Geometry grâce à la relation hasGeometry. La base de connaissances est peuplée avec les informations géométriques de ces deux concepts grâce aux données fournies par le SHOM.

La définition de  $E_{Sinit}$  est affinée par l'ajout de la condition  $[WayPoint(P_i)WayPoint(P_j)] \cap LandArea(x) = \emptyset$ . Ainsi, la *Propriété 5* doit être vérifiée par cette formalisation et l'arête  $[P_1P_2]$  du sous-graphe de visibilité est donc annulée.

#### 4.6.2 Enrichissement de OriginPoint

Un point interpelle notre attention dans la définition du graphe principal : une trajectoire ne peut contenir qu'un seul point de départ et un seul point d'arrivée qui sont considérés comme des OriginPoint. Or, nous allons

voir dans la partie suivante 4.7, que pour générer ce graphe et les différentes lignes de visibilité – qui nous permettent de produire les points de décision – il faut enrichir la base de connaissances par d’autres OriginPoints. Pour ce faire, ces OriginPoints seront fictifs et identifiés dans l’ontologies par le concept VirtualOriginPoint. Ce dernier est un sous concept de Originpoint. La Figure 4.4 représente la hiérarchie des classes telle que le décrivent les enrichissements.

La question qui est soulevée ici, est comment définir ces OriginPoints dans l’espace qui entoure l’environnement maritime côtier où se planifie la trajectoire. La partie qui suit répond succinctement à cette question.

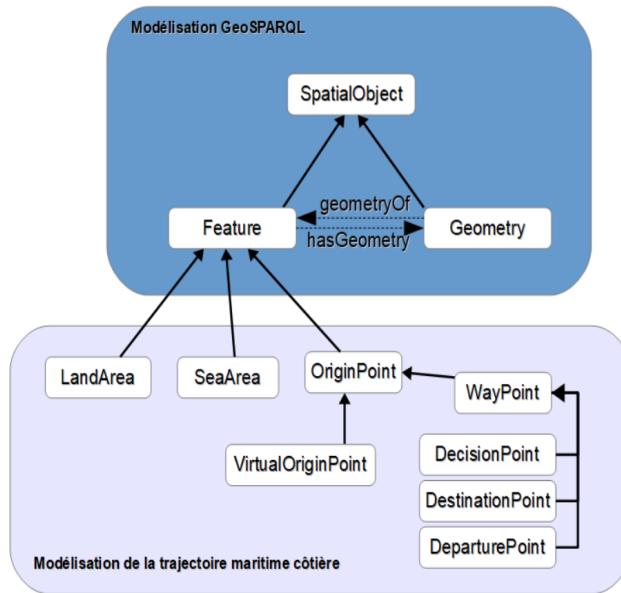


FIGURE 4.4 – Enrichissement conceptuel pour la génération des points de décision

## 4.7 Génération des OriginPoints fictifs

L’analyse de la visibilité d’un espace revient souvent dans la problématique de la simulation de la visibilité et ceci dans la perspective d’intégrer l’analyse dans un système de routage (en robotique par exemple). La problématique relève du domaine de la géométrie et de l’analyse spatiale car selon la position de l’objet en mouvement, nous cherchons les objets dans l’environnement qui peuvent favoriser une trajectoire plutôt qu’une autre.

Dans la littérature des travaux existants, la procédure de cette recherche s'appuie sur la géométrie computationnelle. L'environnement est alors représenté par un polygone donc doté de frontières, qui englobe d'autres polygones – qui représentent les objets composant l'environnement –. Une fois cette modélisation géométrique établie, une recherche spatiale est effectuée pour analyser l'environnement et comment il est perçu selon un point de vue donné (OriginPoint dans notre contexte). L'une des méthodes utilisée pour définir la priorité des objets visibles est celle du partitionnement binaire de l'espace. Introduite par [Fuchs et al. \(1980\)](#), cette méthode a également inspiré la communauté qui travaille sur l'infographie pour l'élimination des surfaces cachées et le calcul des scènes visibles à partir d'un point de vue dans un plan. Nous verrons dans ce qui suit le principe de cette méthode et nous proposerons son application à notre contexte afin de générer les OriginPoints fictifs.

#### 4.7.1 Principe du partitionnement binaire de l'espace

La finalité d'une méthode fondée sur le partitionnement binaire de l'espace est un arbre qui encode les informations sur les relations spatiales entre les formes géométriques issues du partitionnement de l'espace. Comme son nom l'indique, le principe du partitionnement binaire est de subdiviser hiérarchiquement un espace à  $d$ -dimension en sous-espaces se trouvant à l'intérieur de l'espace initial. Plus précisément, l'espace est partitionné récursivement en deux sous-espaces et chacune des sous-partitions est ensuite subdivisée à son tour en deux et ainsi de suite (Figure 4.5). Pour chaque étape, la méthode étudie une problématique relative à un domaine telle que par exemple l'analyse de la visibilité ([Fuchs et al., 1980](#)) ou la propagation des ondes wifi dans un environnement indoor. Par conséquent, le partitionnement se fait jusqu'à ce qu'il y ait une solution optimale à la problématique traitée. Pour encoder les informations sur l'arbre, l'espace initial représente la racine de l'arbre et les feuilles représentent au fur et à mesure les sous-divisions. Dans le contexte de visibilité, cette méthode est appliquée pour analyser la priorité sur la visibilité des objets à partir d'un point de vue. Plus précisément, en considérant un point de vue, la méthode génère un ordre de visibilité des objets se trouvant dans l'espace ou le sous-espace (quel est objet le plus lointain ou quel est l'objet perçu en premier). Dans notre cas, nous voulons traiter le problème inverse. Autrement dit, en considérant des objets dans l'espace, nous cherchons à trouver les points de vue qui donneront une priorité de visibilité (quel pourrait être le premier point de vue à partir duquel un objet est visible). Ainsi, nous aurons un ensemble de point de vue suivant une division binaire de l'espace.

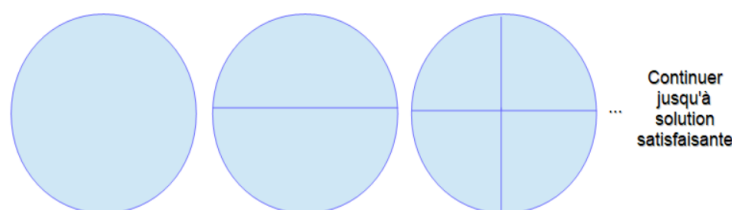


FIGURE 4.5 – Principe du partitionnement de l'espace

### 4.7.2 Partitionnement binaire de l'espace pour la génération des OriginPoints fictifs

Le principe du partitionnement de l'espace ressemble au concept du principe « diviser pour mieux régner ». Dans notre cas, nous allons diviser l'espace pour identifier quels sont les OriginPoints à partir desquels une visibilité d'un objet peut être effectuée ou non. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la finalité de la méthode du partitionnement est un arbre binaire permettant un parcours optimal pour la recherche du premier ou encore du dernier objet visible selon un point de vue. Dans notre cas, il est important de noter que l'ordre de visibilité des repères n'est pas une contrainte de navigation, c'est à dire que le choix d'un repère ne se fait pas par rapport à la distance vis-à-vis de celui-ci mais par rapport à sa seule visibilité – un critère de saillance pourrait intervenir, mais ce critère n'est pas traité dans notre étude –. En conséquence, le parcours de l'arbre qui définit l'ordre de priorité n'est pas important dans notre contexte. Plus précisément, nous cherchons à extraire un ensemble d'OriginPoints qui permettra de générer les différentes lignes de visibilité possibles. Ceci aura pour finalité le sous-graphe de visibilité. Par ailleurs, notre perspective n'est pas de rechercher les plus courts chemins entre deux points mais un ensemble de trajectoires dont la génération s'appuie sur des repères et donc indirectement sur des lignes de visibilité. Par conséquent, plus il y aura de lignes de visibilité dans le graphe, plus il y aura de trajectoires. De même, plus il y aura d'OriginPoints plus le nombre de visibilités augmentera et ainsi le nombre de trajectoires. Par transitivité le nombre de trajectoires dépend donc du nombre de subdivisions de l'espace.

Pour diviser un espace, sa délimitation par le plan à étudier est nécessaire. Compte tenu de l'existence des deux OriginPoints dans la base de connaissances – à savoir le point de départ et le point d'arrivée – et de la délimitation de la trajectoire par ces deux points, les OriginPoints fictifs se localiseront donc au niveau de l'espace délimité entre ces deux points. Ceci

s'explique par le fait que nous cherchons les points de décision se trouvant entre le point de départ et le point d'arrivée.

La Figure 4.6 décrit les étapes de génération des OriginPoints fictifs via le partitionnement de l'espace, compris entre un point de départ et un point d'arrivée. La première étape consiste à délimiter l'espace de recherche des OriginPoints fictifs en traçant une ligne passant par les deux originsPoints qui sont le point de départ et le point d'arrivée. Ceci définit deux sous espaces délimités par leur frontière  $[O_1O_2]$ . Ensuite, le sous espace de la zone maritime sera exploité pour effectuer les subdivisions. Une fois cette étape établie, la médiatrice du segment  $[O_1O_2]$  est construite. Ceci permettra de diviser le sous-espace de la zone maritime en deux comme illustré sur la Figure 4.6a. Nous appliquons le principe de la recherche dichotomique pour déterminer une localisation d'un OriginPoint fictif. A chaque partition en deux, un OriginPoint est placé sur la bissectrice d'un secteur angulaire (Figure 4.6b). Par défaut, la distance à laquelle est défini ce point sera égale à la distance estimée entre le point d'intersection de la médiatrice avec le segment  $[O_1O_2]$  et le point de départ 4.6b. Ceci constitue un paramètre dans l'algorithme. Nous procédons ensuite à la subdivision des deux espaces générés suite à la première segmentation telle que décrit par la Figure 4.6a. Nous remarquons ici que notre partitionnement de l'espace est angulaire. Ceci dans le but de respecter le concept de visibilité sous forme de cercle. Après ce deuxième partitionnement, les OriginPoints fictifs sont désignés sur les bissectrices pour respecter le principe de la dichotomie (Figure 4.6d). A partir de ces étapes nous constatons que pour  $n$  partitions de l'espace,  $n - 1$  originPoints fictifs seront générés.

L'algorithme 1 a été établi afin de réaliser ces étapes pour la génération des OriginPoints fictifs. Cet algorithme décrit une fonction qui sera utilisée par la suite afin de générer le sous-graphe de visibilité. Cependant, comme les propriétés de graphe de visibilité principal font appel au processus de raisonnement par règles SWRL – pour tester la visibilité des repères –, nous n'utiliserons pas un parcours récursif pour assurer un raisonnement sur toutes les données qui sont générées et ne pas complexifier l'algorithme qui inclut déjà l'algorithme de raisonnement. Ainsi, l'utilisateur devra fournir le nombre de subdivisions souhaitées ( $2^n$  subdivisions).

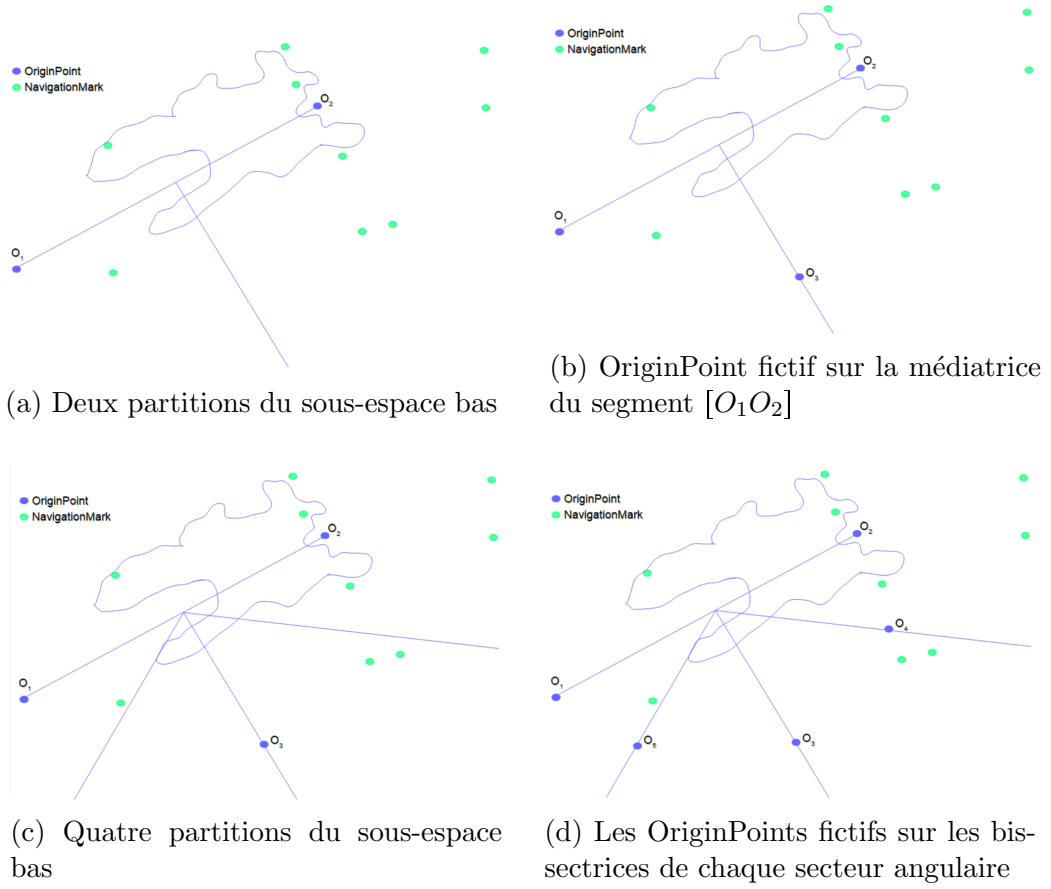


FIGURE 4.6 – Les étapes de génération des OriginPoints fictifs en appliquant le partitionnement binaire de l'espace

## 4.8 Approche globale pour la génération du graphe principal et le sous-graphe de visibilité

A l'issue de l'étape précédente, les OriginPoints fictifs vont nous permettre de générer les lignes de visibilité du graphe principal. Dans la partie 4.5, les OriginPoints étaient prédéfinis mais, suite à la génération des OriginPoints fictifs, nous allons remplacer ceux définis précédemment. Le peuplement de l'ontologie avec ces points fictifs aura pour conséquence de déclencher les règles SWRL relatives aux notions de visibilité. Ceci contribue à la construction des lignes de visibilité et ainsi à la création du graphe de visibilité principal et de son sous-graphe. Ces deux derniers sont composés d'ensembles de sommets et d'arêtes qui sont stockés dans l'ontologie.

---

**Algorithm 1:** Partitionnement de l'espace compris entre deux points

---

```

1 function SpacePartition (DeparturePoint, DestinationPoint,  $2^n$  partitions)
   Input : KB,  $2^n$  partitions
2 //KB= base de connaissances Output : Ensemble des OriginPoints fictifs
3 LineSegmentL  $\leftarrow$  [asWKT(DeparturePoint)asWKT(DestinationPoint)]
4 //midPoint : le milieu d'un segment
5 PointMPoint = midPoint(L)
6 //Azimuth : l'angle d'un segment avec le nord ( $\pm 180$ )
7 Azimuth  $\leftarrow$  azimut([MPointDestinationPoint])
8 for  $i \leftarrow 1$  to  $2^n$  do
9   //éviter de dépasser le -180
10  if Azimuth < -180 then
11    | azimut = azimut + 360
12  end
13  direction  $\leftarrow$  azimut + ( $-90/(2^n/2)$ )
14  //la direction angulaire de la ligne de segmentation
15  originPointfictif  $\leftarrow$  MPoint + length(L/2) on direction
16  // length (L/2) peut être remplacée par (L) ou une autre distance plus
   grande dans le cas où la côte est largement courbée ( $O_7$  dans la Figure 4.8)
17  KB  $\leftarrow$  OriginPoint //mise à jour de l'ontologie
18 end

```

---

- La fonction *PrincipalVisibilityGraph* définie dans l'Algorithme 2 permet de générer les éléments du graphe de visibilité principal en vérifiant, comme définie dans la *Propriété 1*, l'intervisibilité entre un repère et un OriginPoint (obtenu grâce à la fonction *SpacePartition* définie dans l'Algorithme 1). La visibilité est vérifiée en appliquant les différentes règles SWRL définies.
- La fonction *VisibilitySubGraphV* analyse l'intersection des lignes de visibilité dont l'intervisibilité est validée (*VisibilityStm* = {*true*}). Ceci a pour objectif la génération des points de décisions qui résultent d'une éventuelle intersection. Les points de décision retournés par cette fonction définissent les sommets du sous-graphe de visibilité. Par ce résultat, nous aurons satisfait la *Propriété 2*. Dans cet algorithme nous avons défini la longueur des lignes de visibilité à partir de la longueur de la diagonale de la boîte Min-Max des objets ( fonction *diagonal length of Minimum bounding rectangle* dans l'Algorithme 1 ). Cette extension est appliquée afin de prévoir une éventuelle intersection un peu plus loin dans le plan.

---

**Algorithm 2:** Génération du graphe de visibilité principal et de son sous-graphe pour le peuplement de l'ontologie avec leurs éléments

---

```

1  function PrincipalVisibilityGraph (DeparturePoint, DestinationPoint,  $2^n$  partitions)
   Input      : KB,  $2^n$  partitions
   Output     : Ensemble de VisibleLine
2  Query1  $\leftarrow$  Select DeparturePoint, DestinationPoint from KB
3  SpacePartition(DeparturePoint, DestinationPoint,  $2^n$  partitions)
4  //DeparturePoint et DestinationPoint sont les résultats de Query1
5  Query2  $\leftarrow$  Select OriginPoint from KB
6  Query3  $\leftarrow$  Select NavigationMark from KB
7  foreach OriginPoint  $OP_i \in \text{Result}(\text{Query2})$  do
8      foreach NavigationMark  $NM_j \in \text{Result}(\text{Query3})$  do
9          VisibleLine  $\leftarrow [OP_i NM_j]$ 
10         KB  $\leftarrow \text{VisibleLine}$ 
11     end
12 end
13 reasoning // lancer le raisonneur pour vérifier l'intervisibilité entre chaque OriginPoint et chaque
   NavigationMark (Propriété 1)
14 function VisibilitySubGraphV
   Input      : KB
   Output     : Ensemble de DecisionPoint
15 Query4  $\leftarrow$  Select VisibleLine from KB with VisibilityStm={true}
16 Minimumboundingrectangle(Result(Query4))
17 Distance = diagonallengthofMinimumboundingrectangle
18 foreach VisibleLine  $VL_i \in \text{Result}(\text{Query4})$  do
19     foreach VisibleLine  $VL_{i+1} \in \text{Result}(\text{Query4})$  do
20         if Intersects( $VL_i + \text{distance}$ ,  $VL_{i+1} + \text{distance}$ ) then
21             //propriété 2 DecisionPoint  $\leftarrow \text{Intersection}(VL_i + \text{distance}, VL_{i+1} + \text{distance})$ 
22             KB  $\leftarrow \text{DecisionPoint}$ 
23         end
24     end
25 end
26 function VisibilitySubGraphE
   Input      : KB
   Output     : Ensemble des arêtes du sous-graphe
27 Query5  $\leftarrow$  Select DecisionPoint from KB
28 Query6  $\leftarrow$  Select LanArea from KB
29 foreach VisibleLine  $VL_i \in \text{Result}(\text{Query4})$  do
30     foreach DecisionPoint  $DP_j \in \text{Result}(\text{Query5})$  do
31         if Intersects( $VL_i + \text{distance}$ ,  $DP_j$ ) then
32             ListeDP  $\leftarrow \text{ListeDP} \cup DP_j$ 
33         end
34     end
35     foreach DecisionPoint  $DP_k \in \text{ListeDP}$  do
36         foreach DecisionPoint  $DP_{k+1} \in \text{ListeDP}$  do
37             if  $\neg \text{Intersects}([DP_k DP_{k+1}], \text{LandArea})$  then
38                 // Propriété 5 ListeFeature  $\leftarrow \text{ListeFeature} \cup [DP_k DP_{k+1}]$ 
39             end
40         end
41     end
42     KB  $\leftarrow \text{ListeFeature}$ 
43 end

```

---

- La fonction *VisibilitySubGraphE* est définie pour générer les arêtes du sous-graphe. Pour ce faire, l'ensemble des points de décision appartenant à une même ligne de visibilité formeront par paire des segments qui représenteront éventuellement des arêtes du sous-graphe. Ensuite, ces segments sont filtrés avec la vérification de la *Propriété 5*. Cette dernière stipule que le segment est validé s'il n'intersecte pas un obstacle de type LandArea.

Remarquons que chaque fonction a pour objectif de peupler l'ontologie. Une structure de graphe n'est pas explicitement créée mais c'est la base de connaissances qui servira de référence pour stocker les données relatives aux éléments des deux graphes. Par ailleurs, toutes les propriétés ou relations spatiales relatives à des entités géométriques sont aussi intégrées dans l'ontologie. A titre d'exemple, si un point de décision fait partie d'une ligne de visibilité cette information est incluse dans notre base de connaissances.

## 4.9 Exploitation de la base de connaissances

Les données retournées par les différentes fonctions permettent maintenant de générer des WayPoints importants à la définition d'une trajectoire maritime côtière. En effet, à partir des différents éléments générés, l'inférence de la trajectoire est possible lorsque tous les segments nécessaires sont communiqués à l'ontologie. Ce qui est notre cas, suite à l'exécution de toutes les fonctions. Pour expliciter l'exploitation des données générées jusqu'à présent dans l'ontologie, nous présentons dans la Figure 4.7 le processus pour inférer un ensemble de trajectoires tel qu'expliqué dans le Chapitre 2.

La première étape consiste à séparer les mécanismes de raisonnement dans un système. En d'autres termes, notre ontologie principale est séparée en deux ontologies. Une première ontologie qui comprend les règles SWRL mais sans les définitions axiomatiques complexes des concepts de la trajectoire (définis dans la partie 2.4.2.2). A contrario, la deuxième ontologie comprendra tous les axiomes définis dans l'ontologie mais sans les règles SWRL. Cette séparation est effectuée pour éviter une inconsistance dans la base de connaissances lorsque les deux mécanismes de raisonnement sont exécutés en parallèle. Comme les règles utilisées sont SWRL DL-safe, la décidabilité est préservée. En effet, ce type de règles ne considère que les individus exclusivement présents dans la base de connaissances.

Une fois les deux mécanismes de raisonnement séparés, un processus

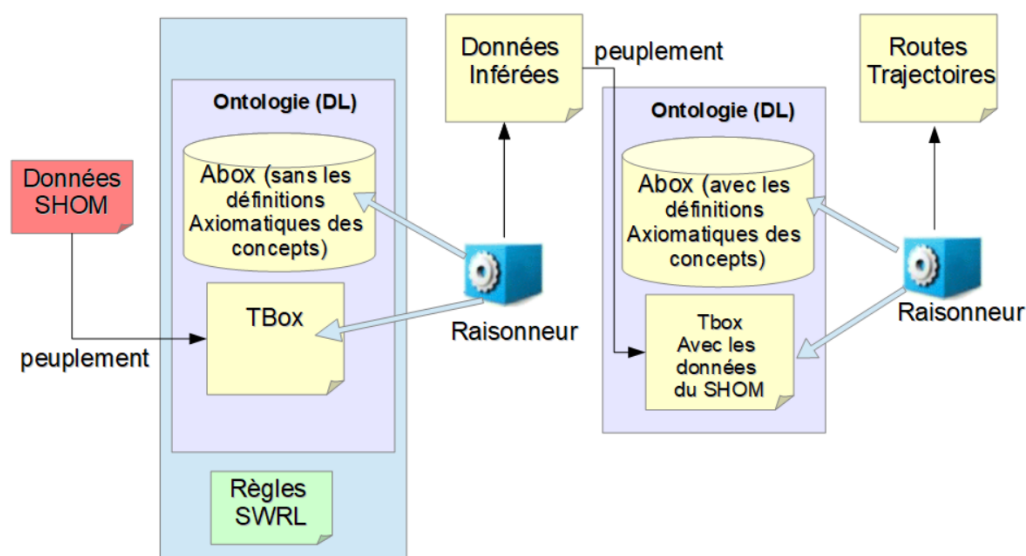


FIGURE 4.7 – Principe global de l'exploitation des données

de peuplement de la deuxième ontologie (sans règle SWRL) est mis en œuvre. Ce processus consiste à peupler la ABox avec les données générées ou inférées par le biais de l'exécution des fonctions définies dans les Algorithmes 1 et 2. Ces derniers prennent donc en considération la première ontologie (avec règles SWRL). Les connaissances générées contribuent à l'assertion des différents concepts définis dans la deuxième ontologie. Ceci nous ramène au processus de raisonnement sur les axiomes comme l'a montré le cas d'étude présenté dans la partie 2.6.

## 4.10 Cas d'étude

Pour tester la faisabilité de l'approche et l'exécution des algorithmes, nous avons repris les mêmes éléments d'entrée que notre cas d'étude exposé dans la partie 3.4. L'ontologie est sous format OWL et le raisonnement est effectué grâce à l'API OWL et le raisonneur Pellet. Nous avons également séparé l'ontologie en deux comme cela est expliqué dans la Figure 4.7. Plus précisément, les fonctions des Algorithmes 1 et 2 sont testées sur une ontologie sans les axiomes complexes. Cette ontologie est peuplée avec les données du SHOM (avec quelques traitements manuels pour communiquer certaines hauteurs de repères). Nous nous sommes limités à une zone de

navigation étendue de la rade Brest à Lorient. Le nombre d'individus global est estimé à 1721 dont 49 NavigationMarks (un résumé sur les statistiques de l'ontologie définie est présenté dans la Figure A.1 de l'annexe A). Le point de départ est localisé sur le port de Brest avec le POINT (-4.53552833333334 48.3501655) comme coordonnées géographiques. Afin de Limiter la complexité des algorithmes, nous avons défini un point de destination situé sur la localisation POINT (-4.24573 47.768125 ). Avec un choix sur quatre partitionnements de l'espace, trois OriginPoints fictifs ont été générés avec les localisations suivantes : POINT (-4.827028914807215 48.203452486507715), POINT (-4.8495937855700415 47.95481225507629), POINT (-4.605939404100239 47.767815940628175).

Les OriginPoints dont le point de départ, le point d'arrivée et le point de destination ont produit 245 lignes de visibilité. Sur chacune de ces lignes l'intervisibilité est testée (un exemple de résultat du test de l'intervisibilité est décrit dans la Figure A.2 de l'Annexe A. Ces nouvelles connaissances enrichissent l'ontologie où la définition des concepts complexes est présente (ontologie sans règle SWRL). Le mécanisme de raisonnement qui considère la formalisation des concepts se fait avec l'outil Protégé. Ainsi la procédure de ce dernier raisonnement suivra le principe qui a été expliqué dans la partie 2.6.

Un exemple graphique est présenté sur la Figure 4.8 afin de mieux expliciter l'intérêt que peut apporter l'approche. Nous avons repris les Figures 4.6 pour tracer les différentes lignes de visibilité autour de l'île d'Ouessant. Dans un premier temps, nous constatons qu'à partir d'un espace ouvert, un réseau de circulation fondé sur les repères est créé et son exploitation est possible après vérification de l'intervisibilité de chaque ligne de visibilité. Dans un second temps, il est important de noter la similitude du résultat obtenu avec les trajectoires définies par les experts et présentées dans la Figure 4.1. Par ailleurs, un plus grand nombre de subdivision donnera plus de précision sur la génération des différentes trajectoires. Le choix d'une trajectoire reviendra à l'utilisateur.

## 4.11 Conclusion

La génération des points de décision, qui représentent un sous-ensemble des WayPoints, a été abordée dans cette partie. Dans cette perspective, nous avons présenté une méthode fondée sur la création des graphes de visibilité. Notre approche nous a conduits à définir différentes propriétés sur le graphe à produire dans un contexte de navigation maritime côtière. La faisabilité

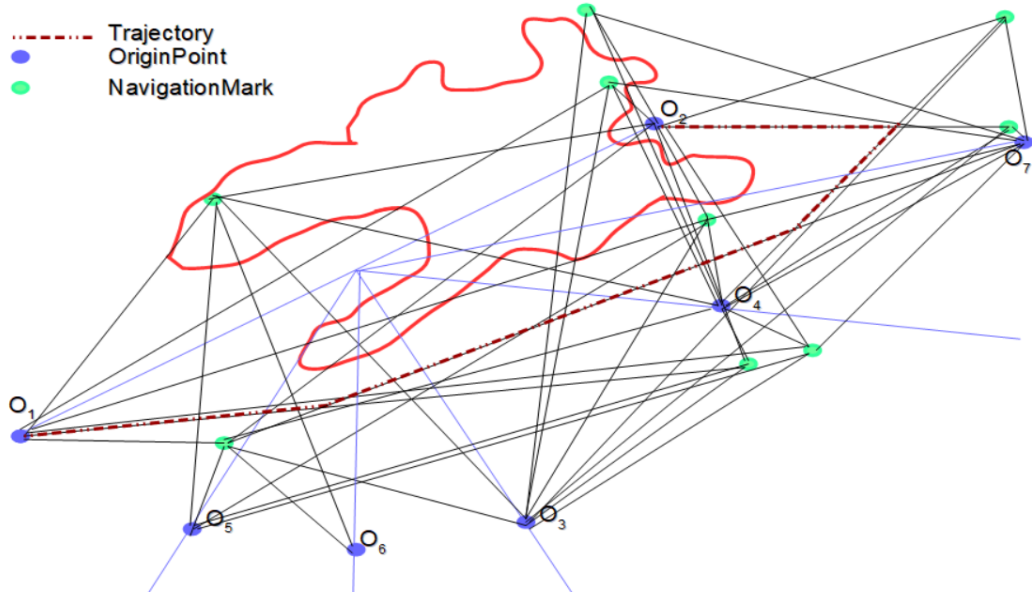


FIGURE 4.8 – Espace ouvert (île d'Ouessant) enrichi avec un réseau de circulation suivant les repères, en appliquant l'approche proposée

de cette création a soulevé une problématique sur la désignation des points de vue (OriginPoint). En effet, dans un contexte général, la construction de graphes de visibilité s'appuie sur des sommets qui représentent les points d'où se vérifie la visibilité. Or ils doivent être prédéfinis. Nous avons fait le choix d'une approche automatique dans laquelle ces sommets ne sont pas connus. Par conséquent, une méthode permettant d'engendrer des points de vue virtuels (OriginPoints fictifs) est présentée avec comme principe la recherche dichotomique ou le partitionnement binaire de l'espace. Cette méthode consiste à diviser l'espace par  $2^n$  et chaque espace résultant peut lui même être divisé à son tour par  $2^n$ . Une fois ce dernier principe appliqué (résultat de l'application de la fonction *SpacePartition*), la construction du graphe de visibilité est établie grâce à la fonction *PrincipalVisibilityGraph*. A partir de ce graphe, que nous appelons graphe de visibilité principal, un sous-graphe de visibilité est construit. Ce sous-graphe a également ses propres propriétés relatives à la construction des routes et des points de décisions. Ces deux derniers concepts représentent respectivement les arêtes et sommets de ce sous-graphe de visibilité.

Pour générer toutes les informations sur les graphes, deux algorithmes sont décrits dans ce chapitre. Le premier englobe les étapes de la génération des points de vue virtuels et le deuxième décrit les fonctions qui permettent

la génération des des deux graphes. Par ailleurs, comme nous nous appuyons sur l'ontologie afin de vérifier la visibilité entre deux sommets du graphe principal, l'ontologie a été enrichie avec trois autres concepts : la zone de navigation (SeaArea) – sur laquelle est générée la trajectoire –, la zone terrestre (LandArea) qui définit les obstacles et les points de vue virtuels (VirtualOriginPoint) qui sont des OriginPoints fictifs. Une vue globale sur la hiérarchie des différents concepts est décrite dans la Figure A.3 de l'annexe A.

Nous avons illustré à la fin de ce chapitre, l'intérêt de générer un tel graphe en montrant qu'il était faisable de configurer un réseau de circulation sur un espace ouvert, naturel et semi-structuré (environnement maritime côtier) et ceci en s'appuyant sur une modélisation ontologique qui englobe la sémantique de la navigation maritime côtière. Cependant, le choix des paramètres utilisés ouvre un débat. Notons que la paramétrisation associée aux OriginPoints fictifs est discutable car nous avons fait le choix d'un processus de routage automatique. Le choix d'un processus semi-automatique (OriginPoint défini par l'utilisateur) aurait supprimé ce paramétrage tout en laissant le processus de routage valide dans son ensemble. En outre, des perspectives pour valider le modèle sont à prévoir afin de comparer les résultats obtenus avec les trajectoires définies par les experts. Les perspectives à court terme et à long terme sont abordées à la fin du présent rapport.



# Conclusion et perspectives

Les travaux de la thèse, présentés dans ce rapport, proposent une modélisation ontologique et sémantique d'une trajectoire maritime côtière dans un contexte de wayfinding. Le modèle défini est exploité pour générer différentes trajectoires qui respectent une navigation fondée sur les repères. De par la définition en logique de description des différents concepts de la trajectoire, le modèle inclut un système de raisonnement qui s'appuie sur les règles SWRL – un mécanisme des technologies du web sémantique –. Ces règles SWRL sont introduites pour inférer des informations relatives à la notion de visibilité des repères. Plus précisément, elles permettent de tester si un objet dans l'environnement est visible à partir d'un point donné ou non. L'un des intérêts de l'approche, est de montrer la faisabilité de la génération d'une trajectoire par le biais d'un modèle ontologique dont les concepts sont formalisés avec un langage fondé sur la logique. L'approche globale gère deux modes de raisonnement afin que les inférences déduites à partir du premier mécanisme servent comme données pour l'assertion dans le deuxième mécanisme. Dans ce qui suit, nous discutons des différentes contributions et présentons des perspectives à l'approche proposée.

## Bilan sur les contributions

Les contributions étudiées dans la thèse, incluent différents modules qui servent à peupler une ontologie dont l'exploitation génère automatiquement un ensemble de trajectoires et ce dans l'environnement maritime côtier. Ces contributions sont du domaine des sciences de l'information géographique. Plus précisément, les travaux développés visent à proposer une modélisation sémantique et spatiale de la navigation maritime pour intégrer de l'intelligence artificielle dans les systèmes d'information géographique à des fins de routage

- Notre première contribution est la formalisation en logique de descriptions de trajectoires de navigation maritime côtière, tout en

prenant en considération les facteurs qui influencent le processus du wayfinding comme la dimension spatiale et la perception de l'environnement – car l'orientation s'appuie sur les repères –. Cette formalisation dépend de plusieurs géométries et donne la possibilité de lier les éléments du modèle par des relations spatiales. Ces dernières décrivent une abstraction des relations existantes entre les objets dans le monde réel. D'une manière globale, la modélisation formelle est générique (haut niveau) dans un domaine d'application précis : la navigation maritime côtière. L'intégration de ce modèle formel dans un système d'information est faisable grâce aux technologies du web sémantique. Ainsi, une modélisation ontologique est établie à l'aide du modèle fournit par le standard GeoSPARQL. La complexité du modèle est à noter dans la manière de lier les différents concepts en prenant en compte l'ensemble des propriétés géométriques de chaque objet. Cette contrainte peut alourdir le mécanisme de raisonnement au niveau axiomatique (OWL-DL), notamment lorsque le nombre d'individus augmente dans la base de connaissances. Aussi, cette contrainte interfère également avec le peuplement de l'ontologie. A titre d'exemple, lors d'une assertion d'un segment, les relations qui relient ce segment aux points qui le forment doivent être incluses dans les connaissances en les exprimant avec des relations spatiales telles que *contains*. Le peuplement de l'ontologie nous a incités à nous poser la question sur le procédé à adopter pour la génération de l'ensemble des individus qui définissent les différents concepts de la trajectoire. La réponse à cette question a engendré d'autres contributions.

- L'application du processus de wayfinding contraint la personne à sélectionner des repères, notamment lorsque l'environnement lui est non familier. Une de nos contributions s'inscrit dans ce cadre et vise à sélectionner les repères qui sont visibles à partir d'un point donné. La procédure de sélection s'appuie sur la définition des règles SWRL. Ces dernières sont définies en suivant notre modélisation ontologique. En outre, elles abordent différentes notions de visibilité telles que la visibilité au rapport avec la distance à l'horizon, la visibilité selon les conditions météorologiques ou encore la visibilité en prenant en compte la topographie de l'espace. L'exécution de ces règles par un mécanisme de raisonnement génère un ensemble de données qui engendrent la définition des lignes de visibilité. Ces dernières contribuent au peuplement de l'ontologie. Toujours dans le contexte de la vérification de la visibilité, nous avons explicité géométriquement la notion de visibilité de nuit qui est fondée sur les

---

feux comme ceux ayant une direction angulaire ou ceux permettant d'éviter les zones de danger. Cependant, nous n'avons pas défini les règles permettant de sélectionner des feux plutôt que des repères par navigation de nuit. Avec cette omission, les trajectoires générées ne sont pas à planifier par navigation de nuit. Cette constatation a orienté notre réflexion sur l'intégration de la dimension temporelle.

- Les WayPoints qui forment la trajectoire sont définis dans l'ontologie, par différents points de décision en plus du point de départ et du point d'arrivée. Ces points de décision doivent aussi être peuplés dans la base de connaissances. Après une analyse graphique, nous avons constaté que ces points de décision sont formés par l'intersection des lignes de visibilité. Ainsi, leur génération requière la mise en œuvre d'une approche permettant de localiser les points de décision éventuels entre le point de départ et le point d'arrivée. Dans cette optique, une méthode automatique qui permet de construire un graphe de visibilité dont les arrêtes décrivent les lignes de visibilité a été proposée. La problématique qui s'est imposée dans la production du graphe, a reposé sur la localisation des points de vue d'où se vérifie la visibilité – le principe de la construction d'un tel graphe dans notre contexte de navigation, repose sur la visibilité entre un OriginPoint (point de vue) et un repère –. Pour venir à bout de cette problématique, un algorithme qui consiste à diviser, graduellement et par régions angulaires, l'espace en  $2^n$  à l'aide de segments a été établi. Sur chacun de ces segments, un point de vue virtuel (OriginPoint fictif) est localisé. Une fois cette opération finalisée, un sous-graphe de visibilité est généré dont les sommets représentent les points de décision et les arêtes (segments) les routes possibles. Ces segments sont localisés sur les lignes de visibilité et ne contiennent aucun obstacle (c'est-à-dire une zone terrestre). Par ailleurs, afin de vérifier la visibilité entre le point de vue et le repère, l'ontologie a été divisée en deux. L'une contient les règles SWRL et l'autre les axiomes de la formalisation des concepts. Les données générées ou inférées suite à la construction des deux graphes servent à peupler l'ontologie contenant les axiomes. Cependant, bien que l'approche contribue à construire un réseau de circulation sur un espace ouvert, la génération des points de vue virtuels reste paramétrable car le changement des localisations des Origins-Points sur les bissectrices, engendre un changement sur la génération des trajectoires.

## Perspectives

Dans le contexte de cette thèse, nous avons mis en œuvre une approche permettant de générer des trajectoires dans un environnement semi-structuré et ouvert. La génération de ces trajectoires est fondée sur un processus de wayfinding en environnement maritime côtier. Par ailleurs, les trajectoires générées doivent respecter les principes de navigation à vue qui s'appuient sur les repères pour opérer les différentes orientations et mener jusqu'à destination. Dans cette perspective, l'approche proposée est fondée sur une modélisation formelle (logique de description) et ontologique. Cette modélisation englobe la sémantique de la trajectoire relative à la navigation maritime côtière. Un mécanisme de raisonnement y est employé afin d'inférer de nouvelles connaissances qui aident à inférer la trajectoire. Comme expliqué ci-avant, différentes contributions ont été suggérées pour mener à bien ces travaux. Ainsi, nous proposons dans cette partie, des perspectives associées à ces contributions dans l'objectif d'enrichir le modèle ontologique.

Le premier axe qui attire notre réflexion est la prise en compte de la dimension temporelle dans la modélisation ontologique. En effet, les principes de navigation de jour diffèrent de ceux en navigation de nuit car les différents feux doivent être pris en compte. L'enrichissement du modèle par la dimension temporelle, permettra la génération de nouvelles trajectoires. Ces dernières peuvent être croisées avec la génération initiale et donnera un résultat plus riche au profit de l'utilisateur. Plus précisément, nous ajouterons la notion du temps dans les prémisses des règles SWRL. Ceci permettra de conditionner la vérification de la visibilité des repères. Par ailleurs, les feux sont classés selon des catégories qui autorisent ou non la navigation dans une zone. Cette contrainte viendra enrichir la *Propriété 5* de la construction du graphe en stipulant qu'en plus de la zone terrestre à éviter, les zones dangereuses spécifiées par les feux ne doivent pas intersecter les segments du sous-graphe de visibilité. De plus, la dimension temporelle permet de prendre en compte le dynamisme de l'environnement lié à la marée dont le coefficient change quotidiennement. Ce dynamisme crée des zones où la navigation est possible durant une période temporelle et ne l'est pas durant une autre période. Une règle SWRL est à prévoir afin de générer ces zones qui sont associées au concept SeaArea. Ce dernier sera enrichi par des attributs comme la profondeur et il sera lié à une propriété de données qui communique l'information sur la possibilité de naviguer ou non durant une période donnée. Ainsi, la *Propriété 5* sera enrichie par cette contrainte. Notons que cette *Propriété 5* peut aussi être enrichie sur le

---

même principe en prenant en compte les obstacles liés à la notion de balisage.

Le deuxième axe des perspectives est orienté vers la validation du modèle ontologique. Ce dernier nécessite le peuplement de certains concepts afin d'inférer la trajectoire, notamment les points de décision qui aident à construire le sous-graphe de visibilité. Afin d'expliquer notre procédure pour valider l'approche, nous reprenons la Figure 1. Sur cette dernière, nous remarquons que les points de décision sont prédéfinis. De ce fait, nous pouvons penser que l'extraction de ces points ou la communication de leur localisation par des experts nous permettra de peupler l'ontologie et de comparer le résultat obtenu par raisonnement avec la trajectoire définie par l'expert. c'est à dire celle proposée dans la Figure 4.1.

Pour une perspective à long terme, notre réflexion s'est orientée vers le croisement de notre approche avec les méthodes d'extraction de connaissances, notamment les méthodes du Traitement Automatique du Langage (TAL). En effet, il existe des ouvrages tels que les *pilotes côtiers* qui proposent des relèvements ou des alignements ou l'orientation à prendre pour accéder à un endroit donné sur la côte. Des extraits de l'un de ces ouvrages Rondeau (2007) sont présentés en Annexe B.1 et B.2. Nous constatons la richesse de la sémantique associée à la navigation maritime côtière. Dans ces textes, nous retrouvons la sémantique que nous avons définie dans notre modèle, à savoir les alignements, les relèvements, les repères, etc. La méthode fondée sur du TAL devra donc extraire ce type d'information pour peupler l'ontologie. L'analyse de l'Annexe B.1 ne peut que confirmer notre perspective d'enrichir le modèle avec la dimension temporelle mais aussi avec les catégories des feux. Ainsi, les méthodes de TAL peuvent également enrichir les concepts relatifs à la navigation de nuit. En outre, les extraits de l'ouvrage font aussi référence au dynamisme de l'environnement maritime et plus précisément à la marée. Cette dernière est désignée par des termes spécifiques (pleine mer, hauteur d'eau, mi-marée, etc.). La richesse des mots pour décrire les concepts de la navigation maritime peut entraîner la création d'un thésaurus pour les concepts définis dans le modèle. Nous pouvons également faire appel aux services d'un dictionnaire pour vérifier les synonymes et comparer le vecteur sémantique des différents mots afin de procéder à l'extraction des informations qui nous intéressent. De plus, les relations spatiales existantes entre les objets dans les textes doivent être extraites. Ceci dans le but de les traduire en relations spatiales qui doivent être en accord avec notre modélisation.

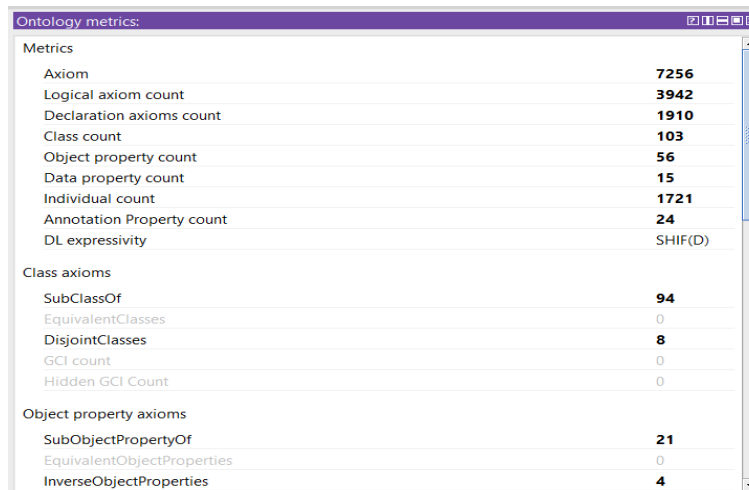
”En vérité, le chemin importe  
peu, la volonté d’arriver suffit à  
tout”

---

Albert Camus

# Annexe A

## La base de connaissances



The screenshot shows a window titled 'Ontology metrics:' with a list of metrics and their corresponding counts. The metrics are grouped into three categories: 'Metrics', 'Class axioms', and 'Object property axioms'. The counts are displayed in a column on the right side of each metric name.

| Ontology metrics:          |         |
|----------------------------|---------|
| Metrics                    |         |
| Axiom                      | 7256    |
| Logical axiom count        | 3942    |
| Declaration axioms count   | 1910    |
| Class count                | 103     |
| Object property count      | 56      |
| Data property count        | 15      |
| Individual count           | 1721    |
| Annotation Property count  | 24      |
| DL expressivity            | SHIF(D) |
| Class axioms               |         |
| SubClassOf                 | 94      |
| EquivalentClasses          | 0       |
| DisjointClasses            | 8       |
| GCI count                  | 0       |
| Hidden GCI Count           | 0       |
| Object property axioms     |         |
| SubObjectPropertyOf        | 21      |
| EquivalentObjectProperties | 0       |
| InverseObjectProperties    | 4       |

FIGURE A.1 – Statistiques sur l’ensemble des objets définis dans l’ontologie établie par l’outil Protégé

```
<!-- http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#VisibleLinePointAPoint337 -->

<NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#VisibleLinePointAPoint337">
  <MaritimTrajectory:VisibilityStm rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#boolean">false</MaritimTrajectory:VisibilityStm>
  <geosparql:hasGeometry rdf:resource="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#lPointAPoint337"/>
</NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#NMark34 -->

<NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#NMark34">
  <MaritimTrajectory:hasHeight rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">90.0</MaritimTrajectory:hasHeight>
  <MaritimTrajectory:hasHorizonVisibility rdf:resource="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#H20"/>
  <geosparql:hasGeometry rdf:resource="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#Point370"/>
  <MaritimTrajectory:visibleFrom rdf:resource="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#Port1"/>
  <MaritimTrajectory:hasWeatherVisibility rdf:resource="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#W"/>
  <MaritimTrajectory:visibleFrom rdf:resource="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#port2"/>
</NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#c20 -->

<NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#c20">
  <geosparql:hasSerialization rdf:datatype="http://www.opengis.net/ont/geosparql#wktLiteral">POLYGON ((-4.5675 48.334337467
  <geosparql:asWKT rdf:datatype="http://www.opengis.net/ont/geosparql#wktLiteral">POLYGON ((-4.5675 48.33433746701958, -4.5
</NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#H20 -->

<NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#H20">
  <geosparql:hasGeometry rdf:resource="http://www.semanticweb.org/wissame/ontologies/2016/MaritimTrajectory#c20"/>
</NamedIndividual>
```

FIGURE A.2 – Exemple de résultats des inférences par règles SWRL après exécution des Algorithmes 1 et 2

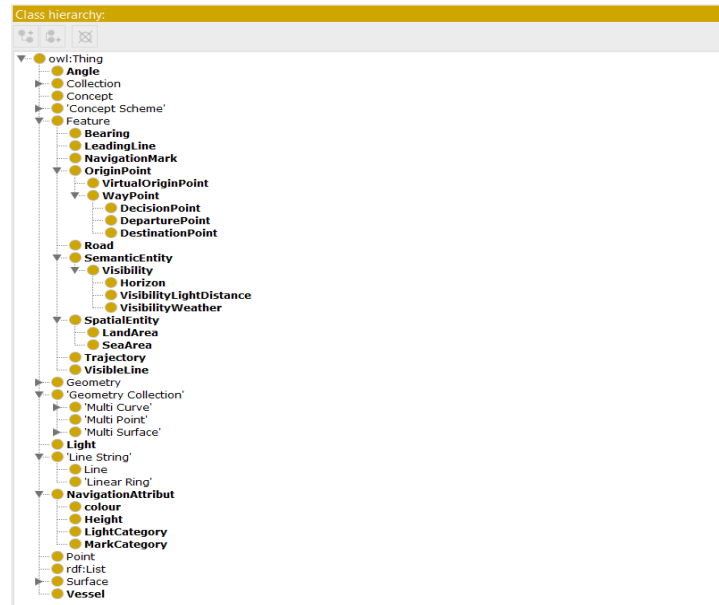
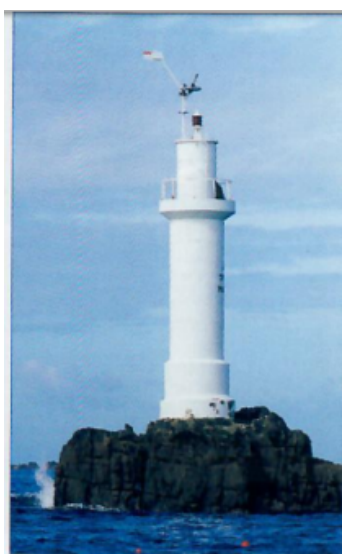


FIGURE A.3 – La hiérarchie des différents concepts définis dans l'ontologie (vue extraite de l'outil Protégé)

## Annexe B

### Exemples d'instructions nautiques textuelles



Le phare des Trois Pierres, au Nord de Molène.

**De nuit.** Lorsque la mer est un peu agitée, le port de Molène n'est accessible par le nord en utilisant le secteur coloré du phare des Trois Pierres et le feu d'adage du môle du terre-plein du port.

En venant du nord, on fera route tout d'abord à la limite à  $191^{\circ}$  des secteurs et rouge du feu des Trois Pierres (isophase 4 sec.) et en approchant du phare s'écartera vers l'ouest. On doit alors apercevoir en arrière le pinceau blanc ( $190^{\circ}$  à  $192^{\circ}$ ) du feu du môle (3 éclats 12 sec.) du terre-plein du port entre une loration verte à l'ouest et rouge à l'Est. Cet étroit pinceau conduit directement la zone de mouillage, les deux tourelles dans l'entrée du chenal et le musoir du digue abri restant plongés dans l'obscurité.

Le chenal des Las à l'Est est également couvert entre un secteur vert au nord et rouge au sud, par l'étroit pinceau blanc ( $259,5^{\circ}$  à  $262,5^{\circ}$ ) du feu du môle qui dans cette direction Est montre des caractéristiques différentes (2 éclats 6 sec.) Dans ce pinceau étroit, il est assez facile de faire route après s'être placé à 0,3 m au nord du feu blanc scintillant de la bouée des Pourceaux qu'on repère aisément à la lisière ouest du secteur blanc intense  $135^{\circ}4$  à  $140^{\circ}4$  du feu (3 occ. 12 sec.) du môle de Lochrist qui couvre le chenal de la Helle.

Il est assez facile aux environs de la pleine mer de passer au-dessus du seuil de rochers entre Molène et l'île du Grand Lédénez. Mais si la hauteur d'eau est insuffisante, il faut quitter l'alignement à  $264^{\circ}$  du chenal des Las lorsque le feu rouge du phare des trois pierres se relève dans le  $315^{\circ}$ . On remonte alors vers le nord et arrondir très largement le phare. La place ne manque pas.

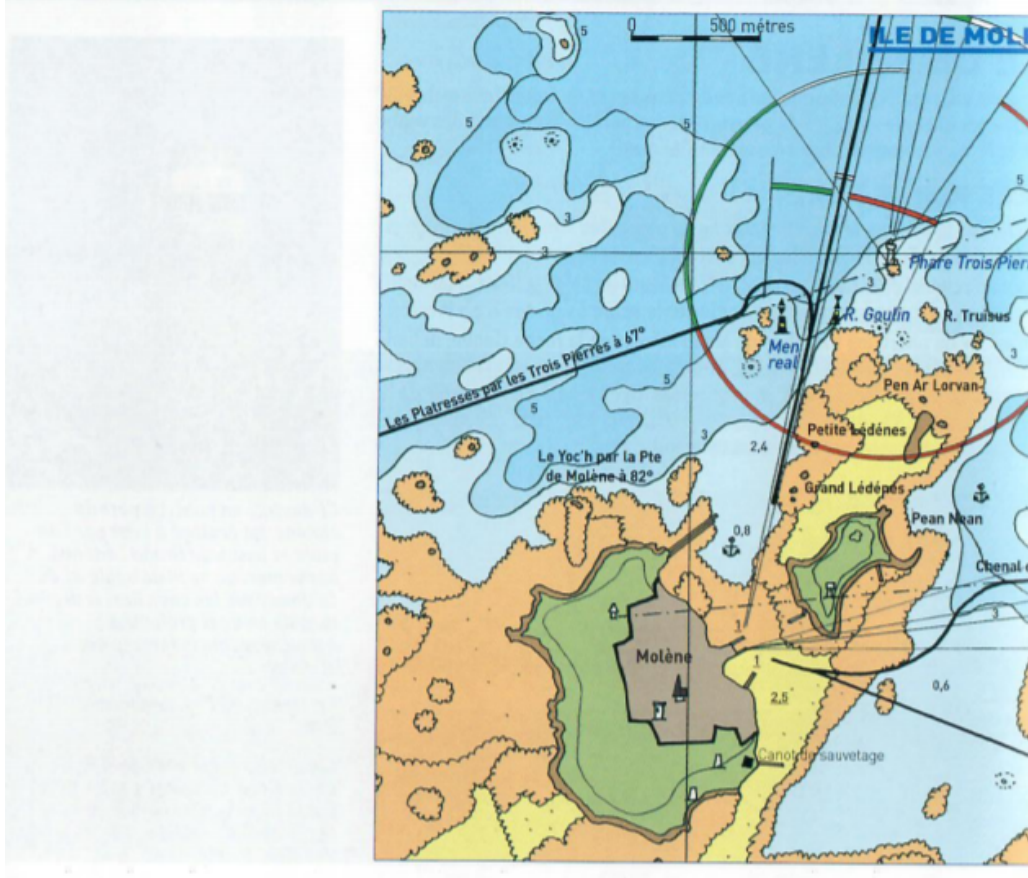


FIGURE B.1 – Extrait de l'ouvrage Pilote Côtier Rondeau (2007)



FIGURE B.2 – Extrait de l'ouvrage Pilote Côtier [Rondeau \(2007\)](#)



# Bibliographie

- Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B. (1993). *Network Flows : Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- Allen, J. F. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Commun. ACM*, 26(11) :832–843.
- Allen, J. F. and Hayes, P. J. (1985). A common-sense theory of time. In *IJCAI*.
- Arthur, P. and Passini, R. (1992a). *Wayfinding : People, Signs, and Architecture*, volume 238. McGraw-Hill Ryerson Book Co., Toronto.
- Arthur, P. and Passini, R. (1992b). *Wayfinding : People, Signs, and Architecture*, volume 238. McGraw-Hill Book Co.
- Baader, F., Calvanese, D., McGuinness, D., Nardi, D., and Patel-Schneider, P. (2003). *The Description Logic Handbook : Theory, Implementation and Applications*. Cambridge University Press.
- Bartie, P., Mills, S., and Kingham, S. (2008). *An Egocentric Urban Viewshed : A Method for Landmark Visibility Mapping for Pedestrian Location Based Services*, pages 61–85. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Berners-Lee, T. (1998). The world wide web : A very short personal history.
- Brosset, D. (2008). *Description d’itinéraire en milieu naturel : modèle intégré de description verbale et de représentation spatiale au sein des SIG*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers (ENSAM Paris).
- Brunet, R. (1980). La composition des modèles dans l’analyse spatiale. *L’espace géographique : régions, environnement, aménagement*, 9(4) :253–265.

- Caduff, D. and Timpf, S. (2005). The landmark spider : Representing landmark knowledge for wayfinding tasks. In Hegarty, R. L., editor, *Reasoning with Mental and External Diagrams : Computational Modeling and Spatial Assistance*, pages 30–35.
- Camossi, E., Villa, P., and Mazzola, L. (2013). Semantic-based anomalous pattern discovery in moving object trajectories. *CoRR*.
- Carpenter, E. G. (1989). Wayfinding : Design breakthrough or trendy buzzword? In *Print*, volume 43, pages 92–163.
- Center, U. S. D. M. A. H. (1994). *Glossary of Mapping, Charting, and Geodetic Terms*. Military standardization handbook. The Center.
- Clark, B. (1981). A calculus of individuals based on connection. *Notre Dame Journal of Formal Logic Notre-Dame, Ind.*, 22(3) :204–218.
- Clark, B. (1985). Individuals and points. *Notre Dame Journal of formal logic*, 26 :61–75.
- Cohn, A. (1997). Qualitative spatial representation and reasoning techniques. *Advances in Artificial Intelligence*, 1303 :1–30.
- Cohn, A., Bennett, B., Gooday, J., and Gotts, N. (1997). Representing and reasoning with qualitative spatial relations about regions. In *Spatial and Temporal Reasoning*.
- Daniel, D. (1997). The description of routes : A cognitive approach to the production of spatial discourse. *Current Psychology of Cognition*, 16 :409–458.
- Daniel, D. (1998). Spatial descriptions as navigational aids : A cognitive analysis of route directions. *Kognitionswissenschaft*, 7 :45–52.
- de Berg, M., van Kreveld, M., Overmars, M., and Schwarzkopf, O. (1997). *Computational Geometry : Algorithms and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- De Floriani, L., Marzano, P., and Puppo, E. (1994). Line-of-sight communication on terrain models. *International Journal of Geographical Information Systems*, 8(4) :329–342.
- Denis, M., Pazzaglia, F., Cornoldi, C., and Bertolo, L. (1999). Spatial discourse and navigation : An analysis of route directions in the city of Venice. *Applied Cognitive Psychology*, 13 :145–174.

- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numer. Math.*, 1(1) :269–271.
- Downs, R. M. (1970). The cognitive structure of an urban shopping center. *Environment and Behavior*, 2 :13–39.
- Egenhofer, M. and Herring, J. (1991). Categorizing binary topological relationships between regions, lines, and points in geographic databases. Technical report, Department of Surveying Engineering, University of Maine.
- Egenhofer, M. J., Sharma, J., and Mark, D. (1993). A critical comparison of the 4-intersection and 9-intersection models for spatial relations : Formal analysis. Technical report, Autocarto 11, R. McMaster and M. Armstrong (eds.), Minneapolis, MN.
- Egorova, E., Tenbrink, T., and Purves, R. S. (2015). Where snow is a landmark : Route direction elements in alpine contexts. In Fabrikant, S. I., Raubal, M., Bertolotto, M., Davies, C., Freundschuh, S., and Bell, S., editors, *Spatial Information Theory. 12th International Conference, COSIT*, pages 175–195, Santa Fe, NM, USA. Springer.
- Elias, B. and Paelke, V. (2008). User-centered design of landmark visualizations. In Liqiu, M., Alexander, Z., and Stephan, W., editors, *Map-based Mobile Services*. Springer Berlin Heidelberg.
- Elias, B. and Sester, M. (2006). Incorporating landmarks with quality measures in routing procedures. In *Geographic Information Science*.
- Epstein, S. L., Aroor, A., Evanusa, M., Sklar, E. I., and Parsons, S. (2015). Learning spatial models for navigation. In Fabrikant, S. I., Raubal, M., Bertolotto, M., Davies, C., Freundschuh, S. M., and Bell, S., editors, *COSIT*, volume 9368 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 403–425. Springer.
- Farr, A. C., Kleinschmidt, T., Johnson, S., Yarlagadda, P. K. D. V., and Mengersen, K. (2014). Investigating effective wayfinding in airports : a bayesian network approach. *Transport*, 29 :90–99.
- Frank, A. U. (1991). Qualitative spatial reasoning about cardinal directions. In *Proceeding of Tenth International Symposium on Computer-Assisted Cartography*, pages 148–167.
- Frank, A. U. (1996). Qualitative spatial reasoning : Cardinal directions as an example.

- Fuchs, H., Kedem, Z. M., and Naylor, B. F. (1980). On visible surface generation by a priori tree structures. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 14(3) :124–133.
- Gaisbauer, C. and Frank, A. U. (2008a). Wayfinding model for pedestrian navigation. In Bernard, L., Friis-Christensen, A., Pundt, H., and Compté, I., editors, *11th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2008*. Springer.
- Gaisbauer, C. and Frank, A. U. (2008b). Wayfinding model for pedestrian navigation. In Bernard, L., Friis-Christensen, A., Pundt, H., and Compté, I., editors, *11th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2008*. Springer.
- Ghosh, S. K. and Goswami, P. P. (2013). Unsolved problems in visibility graphs of points, segments, and polygons. *ACM Comput. Surv.*, 46(2) :22 :1–22 :29.
- Goetz, M. and Zipf, A. (2011). Formal definition of a user-adaptive and length-optimal routing graph for complex indoor environments. *Geo-Spatial Information Science*, 14(2) :119–128.
- Golledge, R. (1999). *Wayfinding Behavior : Cognitive Mapping and Other Spatial Processes*. Johns Hopkins University Press.
- Guarino, N. (1998). *Formal Ontology in Information Systems*. p, Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, 1st edition.
- Guarino, N. and Giaretta, P. (1995). Ontologies and knowledge bases : Towards a terminological clarification. In *Towards very Large Knowledge bases : Knowledge Building and Knowledge sharing*, pages 25–32. IOS Press.
- Guth, P. L. (2004). *The Geometry of Line-of-Sight and Weapons Fan Algorithms*, pages 271–285. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Hägerstrand, T. (1989). Reflections on “what about people in regional science?”. *Papers of the Regional Science Association*, 66(1) :1–6.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., and Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2) :100–107.

- Hayet, J.-B., Esteves, C., and Murrieta-Cid, R. (2010). *A Motion Planner for Maintaining Landmark Visibility with a Differential Drive Robot*, pages 333–347. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Hendricks, M. D., Egenhofer, M. J., and Hornsby, K. (2003). Structuring a wayfinder’s dynamic space-time environment. In Kuhn, W., Worboys, M. F., and Timpf, S., editors, *COSIT*, volume 2825, pages 75–92. Springer.
- Herring, J., Mark, D. M., (eds.), J. H., Mark, D. M., Egenhofer, M. J., and Egenhofer, M. J. (1994). The 9-intersection : Formalism and its use for natural-language spatial predicates.
- Horridge, M., Drummond, N., Goodwin, J., Rector, A., Stevens, R., and Wang, H. (2006). The manchester owl syntax. In *Second Workshop on OWL Experiences and Directions*, Athens, GA, USA.
- Ishikawa, T. and Kiyomoto, M. (2008). Turn to the left or to the west : Verbal navigational directions in relative and absolute frames of reference. In Cova, T. J., Miller, H. J., Beard, K., Frank, A. U., and Goodchild, M. F., editors, *Geographic Information Science, 5th International Conference, GIScience*, Park City, UT, USA. Springer Berlin Heidelberg.
- Kiefer, P., Scheider, S., Giannopoulos, I., and Weiser, P. (2015). A wayfinding grammar based on reference system transformations. In Fabrikant, S. I., Raubal, M., Bertolotto, M., Davies, C., Freundschuh, S., and Bell, S., editors, *Spatial Information Theory - 12th International Conference, COSIT*, pages 447–467, Santa Fe, NM, USA. Springer International Publishing.
- Kikiras, P., Tsetsos, V., and Hadjiefthymiades, S. (2006). Ontology-based user modeling for pedestrian navigation systems. In Gerhard, B., Silvia, C., Anna, P., and Paolo, T., editors, *ECAI Workshop on Ubiquitous User Modeling (UbiqUM)*, Riva del Garda, Italy. IOS Press.
- Korf, R. E. (1990). Real-time heuristic search. *Artificial Intelligence*, 42(2) :189 – 211.
- l. Sala, P., Sim, R., Shokoufandeh, A., and Dickinson, S. J. (2006). Landmark selection for vision-based navigation. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(2) :334–349.
- Laurini, R., Sebillo, M., and Vitiello, G. (2010). Advanced cartographic representations - cartograms and chorems. In Haklay, M., editor, *Interacting with Geospatial Technologies*, pages 168–171. Wiley-Blackwell, Oxford : Blackwell.

- Li, R., Fuest, S., and Schwering, A. (2014). The effects of different verbal route instructions on spatial orientation. In Huerta, G., Schade, J., and Granell, C., editors, *The 17th AGILE conference on geographic information science*, Castellón, Spain. Springer.
- Lynch, K. (1960). The image of the city. *MIT Press*, 0 :194.
- Michon, P.-E. and Denis, M. (2001). When and why are visual landmarks used in giving directions. In *Spatial Information Theory*.
- Montello, D. R. and Sas, C. (2006). *Human factors of wayfinding in navigation*, pages 2003–2008. CRC Press/Taylor & Francis, Ltd, London, 2 edition.
- Mueller, S. T., Perelman, B. S., and Simpkins, B. G. (2013). Pathfinding in the cognitive map : Network models of mechanisms for search and planning. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, 5 :94–111.
- Neches, R., Fikes, R., Finin, T., Gruber, T., Patil, R., Senator, T., and Swartout, W. R. (1991). Enabling technology for knowledge sharing. *AI Mag.*, 12(3) :36–56.
- Nilsson, N. J. (1969). A mobius automation : An application of artificial intelligence techniques. In *Proceedings of the 1st International Joint Conference on Artificial Intelligence*, IJCAI’69, pages 509–520, San Francisco, CA, USA. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Norman, D. (1988). *The DESIGN of EVERYDAY THINGS*. Basic Books ; Revised Edition.
- Nothegger, C., Winter, S., and Raubal, M. (2004). Selection of salient features for route directions. *Spatial Cognition & Computation*, 4(2) :113–136.
- Papadopoulos, S., Zigkolis, C., Kompatsiaris, Y., and Vakali, A. (2010). Cluster-based Landmark and Event Detection on Tagged Photo Collections. *IEEE Multimedia*, 18(1) :52–63.
- Parent, C., Spaccapietra, S., Renso, C., Andrienko, G., Andrienko, N., Bogorny, V., Damiani, M. L., Gkoulalas-Divanis, A., Macedo, J., Pelekis, N., Theodoridis, Y., and Yan, Z. (2013). Semantic trajectories modeling and analysis. *ACM Comput. Surv.*, 45(4) :42 :1–42 :32.
- Quesnot, T. and Roche, S. (2015). Measure of landmark semantic salience through geosocial data streams. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4 :1–31.

- Quillian, R. (1968). Semantic memory. In *Semantic Information Processing*, pages 216–270. MIT Press.
- Quine, W. V. (1953). *From a logical point of view*. Harvard University Press.
- Randell, D. and Cohn, A. G. (1989). Modelling topological and metrical properties in physical processes. In eds), *Proceedings 1st International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 55–66. Morgan Kaufmann.
- Randell, D. A., Cui, Z., and Cohn, A. G. (1992). A Spatial Logic based on Regions and Connection. In Nebel, B., Rich, C., and Swartout, W., editors, *Principles of Knowledge Representation and Reasoning : Proceedings of the Third International Conference*, pages 165–176, San Mateo, California. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Raubal, M. and Egenhofer, M. (1998). Comparing the complexity of wayfinding tasks in built environments. *Environment & Planning B : Planning and Design*, 25(6) :895–913.
- Raubal, M., Egenhofer, M. J., Pfoser, D., and Tryfona, N. (1997). Structuring space with image schemata : Wayfinding in airports as a case study. In *Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory*, pages 85–102. Springer-Verlag.
- Raubal, M. and Winter, S. (2002). Enriching wayfinding instructions with local landmarks. In Egenhofer, M. J. and Mark, D. M., editors, *Geographic Information Science*, pages 243–259, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Raubal, M. and Worboys, M. F. (1999). A formal model of the process of wayfinding in built environments. In Freksa, C. and Mark, D. M., editors, *Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science COSIT*, volume 1661 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 381–399. Springer.
- Rehrl, Leitinger, Gartner, and Ortog (2009). An analysis of direction and motion concepts in verbal descriptions of route choices. In Hornsby, K. S., Claramunt, C., Denis, M., and Ligozat, G., editors, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Spatial Information Theory, COSIT*, volume 5756 of *Lecture Notes in Computer Science*, Aber Wrac’h, France. Springer.
- Rondeau, A. (2007). *Pilote cotier Brest Quiberon*. Praxys Diffusion.

- Scholz, J. and Schabus, S. (2014). An indoor navigation ontology for production assets in a production environment. In Duckham, M., Stewart, K., and Pebesma, E., editors, *Geographic Information Science*, pages 204–220, Vienna, Austria. Springer.
- Siegel, A. and White, S. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. In Reese, H., editor, *Advances in child development and behavior*, pages 9–55. Academic Press, New York.
- Sorrows, M. E. and Hirtle, S. C. (1999). The nature of landmarks for real and electronic spaces. In *Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science*.
- Spaccapietra, S., Parent, C., Damiani, M. L., de Macêdo, J. A. F., Porto, F., and Vangenot, C. (2008). A conceptual view on trajectories. *Data Knowl. Eng.*, 65(1) :126–146.
- Stoffel, E.-P., Lorenz, B., and Ohlbach, H. J. (2007). Towards a semantic spatial model for pedestrian indoor navigation. In Embley, D. W., Olivé, A., and Ram, S., editors, *International Conference on Conceptual Modeling : Advances in Conceptual Modeling Foundations and Applications*, pages 328–337, Tucson, AZ, USA. Springer.
- Timpf, S. (2001). Geographic task models for geographic information processing. In Duckham, M. and M.F., W., editors, *Meeting on Fundamental Questions in Geographic Information Science*, pages 217–229. University of Zürich, Department of Geography, Manchester, UK.
- Timpf, S. (2002). Ontologies of wayfinding : a traveler’s perspective. *Networks and spatial economics*, 2(1) :9–33.
- Tsatcha, D. (2014). *Contribution à l’extraction et à la représentation des connaissances de l’environnement maritime. Proposition d’une architecture dédiée aux applications de navigation*. Thèse de doctorat, Université de Brest.
- Vandecasteele, A., Devillers, R., and Napoli, A. (2014). From movement data to objects behavior using semantic trajectory and semantic events. *Marine Geodesy*, 37(2 - Special Issue : Special Issue on Coastal and Marine Geographic Information Systems) :126–144.
- Vilain, M. B. (1982). A system for reasoning about time. In *Conf. Artificial Intelligence pp. 197-201*.

- Wenig, N., Wenig, D., Ernst, S., Malaka, R., Hecht, B., and Schöning, J. (2017). Pharos : Improving navigation instructions on smartwatches by including global landmarks. In *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '17, pages 7 :1–7 :13, New York, NY, USA. ACM.
- Winter, S. (2003). Route adaptive selection of salient features. *Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science*, 2825 :349–361.
- Winter, S., Raubal, M., and Nothegger, C. (2004). Focalizing measures of salience for wayfinding. In *In L. Meng, A. Zipf & T. Reichenbacher (Eds.), Map-based Mobile Services - Theories, Methods and Implementations*, pages 127–142. Springer Geosciences.
- Wither, J., Au, C. E., Rischpater, R., and Grzeszczuk, R. (2013). Moving beyond the map : Automated landmark based pedestrian guidance using street level panoramas. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '13, pages 203–212, New York, NY, USA. ACM.
- Yan, Z., Giatrakos, N., Katsikaros, V., Pelekis, N., and Theodoridis, Y. (2011). Setrastream : Semantic-aware trajectory construction over streaming movement data. In Pfoser, D., Tao, Y., Mouratidis, K., Nascimento, M. A., Mokbel, M., Shekhar, S., and Huang, Y., editors, *International Symposium on Spatial and Temporal Databases SSTD : Advances in Spatial and Temporal Databases*, volume 6849 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 367–385. Springer.
- Yang, L. and Worboys, M. (2015). Generation of navigation graphs for indoor space. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(10) :1737–1756.
- Zheng, Y., Chen, Y., Li, Q., Xie, X., and Ma, W.-Y. (2010). Understanding transportation modes based on gps data for web applications. *ACM Transactions on the Web (TWEB)*, pages 1 :1–1 :36.

**Titre :** Vers une émergence des systèmes d'information géographique maritime fondés sur la connaissance : application aux systèmes d'aide à la navigation

**Mots clés :** Ingénierie des connaissances, SIG, Ontologie, OWL, SWRL, Aide à la Décision

**Résumé :** Associés à un mécanisme de raisonnement, les systèmes de routage aident un utilisateur à trouver un chemin en proposant différentes possibilités de trajectoire dans un environnement donné : ce processus est appelé « wayfinding ». La navigation maritime côtière ne fait pas exception aux besoins d'un tel système. En effet, les navigateurs non familiers d'une zone de navigation font souvent appel à de multiples ressources non automatisées pour arriver à destination. Pour pallier cette contrainte, un modèle fondé sur l'intelligence artificielle est établi et intégré dans ces systèmes d'aide à la décision afin de proposer différents itinéraires. Les travaux de cette thèse s'intéressent aux aspects de modélisation et d'intégration dans un système d'information du processus de « wayfinding » en environnement maritime côtier. Les objectifs scientifiques de ces recherches portent tout d'abord, sur la conceptualisation sémantique d'une trajectoire de navigation maritime côtière

Trois composantes sont ainsi distinguées et modélisées : l'espace, le temps et la sémantique. Les objectifs scientifiques portent ensuite sur la modélisation formelle (Logiques de Description) de la trajectoire de navigation. À partir de cette modélisation formelle, un modèle ontologique est déterminé avec le langage OWL afin d'intégrer une telle formalisation dans un système d'information. Ce modèle représente une base de connaissances formée par des axiomes et qui, enrichie d'instances, permet le raisonnement. Les axiomes sont inspirés de la formalisation préétablie et les instances sont alimentées via une base de données ou inférées grâce à des règles SWRL ou instancié par un algorithme. Au final, cette recherche vise à intégrer le modèle établi dans un système d'information « intelligent » favorisant le raisonnement grâce à une ontologie et un algorithme de routage, et à proposer un ensemble de routes de navigation, susceptibles d'être adaptées aux préférences de l'utilisateur final : le marin.

**Title :** Towards the emergence of knowledge-based maritime geographic information systems: application to navigation assistance systems

**Keywords :** Knowledge Engineering KE, GIS, Ontology, OWL, SWRL, Decision Making

**Abstract :** When associated with a reasoning mechanism, routing systems help a user to reach a destination by offering different path possibilities in a given environment: this process is called "wayfinding". Coastal maritime navigation is no exception to the needs of such a system. In fact, sailors that are unfamiliar with a navigation area, often rely on several non-automated resources to reach their destinations. To overcome this constraint, a model based on artificial intelligence is established and integrated into these decision support systems in order to recommend different routes. The work presented in this thesis is concerned with the aspects of modeling and integration, into an information system, of the "wayfinding" process, in a coastal maritime environment. The scientific aims of this research are related first to the semantic conceptualization of a coastal maritime trajectory.

Three components are thus distinguished and modeled: space, time and semantics. The scientific objectives then, focus on the formal modeling (Description Logics) of the trajectory. From this formal modeling, an ontology-based model is determined with the OWL language in order to integrate such formalization into an information system. This model represents a knowledge base described by axioms to allow reasoning. The axioms are inspired by the pre-established formalization and the instances are enriched through a database or an algorithm or inferred through SWRL rules. Finally, this research aims to integrate the established model into an "intelligent" information system promoting reasoning through an ontology and a routing algorithm, and to propose a set of navigation routes that can be adapted to the sailor preferences.