

Formalisation spatio-temporelle de perturbations maritimes pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime

Martin Tanguy, Aldo Napoli

▶ **To cite this version:**

Martin Tanguy, Aldo Napoli. Formalisation spatio-temporelle de perturbations maritimes pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime. SAGEO 2016 - Spatial Analysis and GEOmatics, Analyse Spatiale et des Sciences de l'Information Géographique, Dec 2016, Nice, France. hal-01417871

HAL Id: hal-01417871

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01417871

Submitted on 16 Dec 2016

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.

Formalisation spatio-temporelle de perturbations maritimes pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime

Martin Tanguy, Aldo Napoli

CRC- Centre de recherche sur les Risques et les Crises, MINES ParisTech, PSL University.
CS 10207 rue Claude Daunesse 06904 Sophia Antipolis Cedex, France
martin.tanguy@mines-paristech.fr, aldo.napoli@mines-paris.fr

RESUME. L'objectif de cet article est de proposer une méthodologie pour formaliser les risques maritimes via leurs caractéristiques spatio-temporelles. En effet, l'espace maritime connait des risques, qu'ils soient de nature anthropique (marrée noires, collisions entre navires, piraterie maritime…) ou naturels (tempêtes, icebergs, récifs…). Ces risques ont un impact sur le réseau de transport maritime : ils peuvent générer des accidents mais également influer sur l'usage de l'espace maritime pour le transport par le biais de baisses d'accessibilité à l'espace. Cet article propose une méthodologie pour la formalisation des risques en mer pour la simulation de leurs effets sur le réseau maritime.

ABSTRACT. The objective of this paper is to propose a methodology for assessing the vulnerability of marine energy network., Maritime space know whether anthropogenic (black tide, collisions with ships, maritime piracy ...) or natural (storms, icebergs, reefs ...). These risks make it vulnerable marine space to transport energ. Accessibility is defined as the ability of a place to be reached within a given spatial structure. (Rodrigue, 2013). Thus, the aim of the thesis is based on the measurement of these accessibility decreases the effects that these disturbances on marine energy network.

MOTS-CLES : Risques maritimes, modélisation spatio-temporelle, simulation multi-agent.

KEYWORDS: Maritime risks, spatiotemporal modelling, agent-based simulation.

1. Introduction

L'essor des transports à une échelle globale s'inscrit dans un phénomène de mondialisation et 90% des biens échangés au travers le monde sont effectués par voie maritime. La maritimisation se définit comme un processus de dépendance économique des états au trafic maritime due à ce phénomène de mondialisation (Vigarié, 1983). Ce phénomène transforme les territoires, et principalement les espaces côtiers mais a également comme conséquence une territorialisation des espaces maritimes, à savoir une utilisation et gestion des espaces pour les activités humaines. L'utilisation de cet espace a augmenté depuis 1970 et principalement le transport, que ce soit via porte-conteneurs ou tanker. Cela forme ainsi un réseau de transport maritime lié à l'emplacement des ports dans le monde. Cependant ce réseau s'étend sur un espace vaste et dynamique, l'espace maritime, qui peut générer des risques pour l'usage de l'espace à des fins de transports. L'objectif de cet article est de propose une démarche méthodologique pour formaliser un environnement de simulation et évaluer de la vulnérabilité du transport maritime.

1.1. Le réseau maritime face au risque

L'espace maritime est constamment en changement. Cette spécificité est décrite par la notion d'hypermobilité (Parrain, 2012). Cela signifie que les composants du territoire sont dynamiques, rendant ces espaces particulièrement risqués pour le transport maritime, que ce soit en pleine mer ou dans les espaces littoraux. Elliott et al. (2014) proposent une typologie des risques en mer qu'ils soient de nature anthropologique ou naturels. Ces risques sont répartis en 14 catégories en fonction des causes des aléas. Ces risques ont des caractéristiques spatio-temporelles propres. Certains risques sont statiques, comme les récifs, mais certains sont plus complexes et dynamiques. Cela regroupe des risques comme les tempêtes dont la dynamique est liée aux conditions atmosphériques ou la piraterie maritime liée à des problèmes de nature géopolitique. L'IMO (International Maritime Organisation) classifie en deux catégories les risques en mer : il s'agit de la sécurité (les risques liés à l'activité même) et la sûreté liée à des actions volontaires et délibérées de nuire (piraterie, terrorisme en mer). Ces risques sont d'autant plus difficiles à prendre en compte du fait que la dynamique de ces risques dépend de la dynamique du trafic maritime sur le réseau.

Ces risques ont un impact en provoquant des perturbations sur le réseau maritime et produisent un coût supplémentaire pour le transport, en raison du temps supplémentaire et de la distance nécessaire pour atteindre le port de destination. Les perturbations sont définies par une perte de performance du médiateur spatial pour relier les différentes parties de la structure spatiale (Zavitsas, 2012). La perte d'efficacité peut être caractérisée par la taille, l'échelle et le temps lié à la perte d'accessibilité qui affectant l'efficacité du réseau maritime. La vulnérabilité peut être définie comme un impact, comme le degré de dégradation de la perturbation, ou comme une capacité à réagir et à réorganiser la structure spatiale après la

perturbation (Veyret et Reghezza, 2005). Plusieurs approches existent pour étudier la vulnérabilité, toutes liées à la notion d'accessibilité, à savoir la capacité d'un lieu à pouvoir être rejoint (Rodrigue, 2013). En effet, l'espace maritime est un médiateur spatial et son efficacité est liée aux opportunités de déplacement offertes (Gleyze, 2005).

1.2. Les aléas comme perturbation du réseau

Le rôle d'un réseau de transport est de relier efficacement des lieux entre eux afin d'optimiser son utilisation. Dans le cas du transport maritime, Berle et al. (2011) définissent pour principal enjeu du transport maritime, la recherche de maximisation du coût de transport face aux différents chemins possibles dans l'espace maritime. Ainsi la notion de vulnérabilité d'un réseau de transport se focalise sur les impacts possibles liés à des pertes d'efficacité des réseaux, construits par les possibilités offertes par l'espace. Berdica et Mattsson(2007) s'intéressent à la vulnérabilité en considérant, pour un réseau de transport donné, la susceptibilité que des incidents entrainent une réduction considérable du niveau de service du réseau. Ce niveau de service correspond à l'efficacité du réseau à remplir son rôle de médiateur spatial (Gleyze, 2005). Pour mesurer ces pertes d'efficacité, Taylor et Susilawati (2012) montrent que l'ensemble des mesures existantes repose sur le concept d'accessibilité à l'espace(mesure locales ou globales) comme la facilité d'atteindre dans un réseau la destination désirée (Niemeier, 1997). Ainsi les perturbations peuvent dans un réseau donné, soit rendre inaccessible la destination désirée soit rendre plus difficile (plus long) le chemin entre deux localisations dans le réseau.

La question principale est ainsi de savoir comment adapter des mesures propres aux graphes à la spécificité spatiale du réseau maritime : en effet, si les nœuds représentent les ports et plateformes du réseau, les liens ne peuvent être pris en considération, à savoir que deux nœuds peuvent être liés par une infinité de liens. La mise en place d'indices prenant en compte ces spécificités est donc nécessaire. En effet, dans le cadre classique d'une analyse de réseau par théorie des graphes, une perturbation est modélisée par ablation d'un composant voire d'une partie du réseau (Murray et Grubesic, 2007). Cependant du fait des possibilités des destinations dans l'espace maritime pour les navires, la prise en compte des perturbations demande une modélisation spécifique de celle-ci.

Ainsi, les perturbations doivent également se voir attribuer des propriétés spatiales adaptées : une géométrie, permettant de définir l'extension de la perturbation dans l'espace maritime, mais également une temporalité, indiquant l'évolution de cette spatialité dans le temps. Ainsi, les perturbations peuvent se définir comme des objets spatio-temporels.

1.3. Objectif de recherche

Cette recherche ayant pour objet d'évaluer la vulnérabilité dans un contexte de risque, l'objectif est de simuler des perturbations spatio-temporelles afin de tester

l'influence de celles-ci sur le réseau maritime de l'énergie. Ces perturbations, modélisées sous forme d'objets spatio-temporels ont une forme, une extension spatiale, une temporalité ainsi qu'un impact sur l'accessibilité à l'espace pour un navire donné. L'objectif est ainsi de formaliser les perturbations en fonction de spatialité et temporalité dans le but de comparer les effets de ceux-ci sur le réseau maritime.

Pour cela, le réseau étant ici considéré comme l'ensemble des déplacements effectué dans l'espace maritime, l'objectif est de décrire des comportements individuels liés aux niveaux d'accessibilité offert par l'espace maritime. Deux étapes sont nécessaires pour la construction des comportements : premièrement, le choix d'une destination du voyage à partir d'un point de départ dans le réseau. Deuxièmement, le comportement spatial du navire au travers du médiateur spatial. Ces comportements sont liés aux niveaux d'accessibilité de l'espace maritime et permettent, à postériori de mesurer la vulnérabilité du réseau maritime par le biais des caractéristiques spatio-temporelles des différents comportements spatiaux des navires et en fonction des scénarios de perturbations dans l'espace maritime. Cela peut entrainer des configurations inattendues du réseau maritime en fonction des paramètres des perturbations.

2. Objet et simulation spatio-temporelle

Pour comprendre l'influence de ces perturbations, il convient de se questionner sur l'aspect spatio-temporel propre aux caractéristiques de l'espace maritime, en effet, celles-ci ont des natures diverses : elles peuvent se déplacer (icebergs) se diffuser (marées noires) et possèdent dans chaque cas de figure des caractéristiques propres. Dans le cadre de la mise en place de simulation, il est ainsi nécessaire de formaliser les perturbations spatio-temporelles.

2.1. Objets spatio-temporels

Pour simuler les effets des perturbations sur le réseau maritime, il est nécessaire d'avoir recours à des principes de modélisation spatio-temporelle. Deux approches en modélisation spatio-temporelles existent : la conceptualisation de l'espace en tant qu'objet (perceptive discrète) et en tant que champs (perceptive continue). Le point de vue dit discret, ou centré-objet, est que chaque objet dans l'espace possède ses propres délimitations, ses frontières, dans l'espace et le temps. Ils sont distincts entre eux et de l'ensemble de l'espace, qui est alors un support d'objets spatio-temporels. (Mathian and Sanders, 2014). C'est dans cette perspective que cette recherche s'inscrit.

Peuquet(1994) définit un objet géographique par 3 axes interdépendants : le Quoi (Nature de l'objet représenté), le Où (Situation et dimension de l'objet dans l'espace) et le Quand (Processus et évènements de l'objet dans le temps). Le premier axe, le Quoi, cherche à déterminer la nature de ce qui est modélisé. Deux types

d'objets pouvant être distingués : les objets « *bona fide* » correspondant à des objets dits naturels ayant une existence physique et matérielle et les objets « *fiat* » construit pour la modélisation, correspondant à des limites arbitraires, socialement construits par et pour l'homme, ils correspondent aux limites politiques, administratives, juridiques ou sociales. Ces objets possèdent des attributaires associées à l'objet. Le second axe, le Où, cherche à définir l'emplacement et la forme des objets spatiaux. En soi, cet axe n'est pas une spécificité de la modélisation spatio-temporelle mais peut-être vu comme une base : c'est la modification des géométries simples spatiales des objets (points, lignes, réseaux, polygones ou volumes) qui va permettre de modéliser le changement. En effet, la localisation des objets peut se modifier dans le temps. Il faut ainsi distinguer les objets fixes, qui n'admettent pas de modification spatiale au cours du temps et les objets mobiles, qui peuvent se déplacer dans l'espace. Le dernier axe, Quand, est certainement le plus important dans le cadre de la modélisation spatio-temporelle. En effet, c'est par le croisement entre les questions Où et Quand que les notions d'évènements (une singularité dans l'espace et le temps) et de processus, à savoir ce qui entraine la modification des objets géographiques (Livet et al., 2010). Ces modifications sont à l'origine de la dynamique des objets.

2.2 Dynamique des objets spatio-temporels

La dynamique des objets spatio-temporels est liée à la prise en compte du changement par et pour ces objets dans l'espace. En effet, ces objets apparaissent, disparaissent et se modifie au cours du temps.

Les objets peuvent être caractérisés en fonction de leurs rapports au temps. Grenon et Smith (2004) distinguent deux types d'entités. Les entités SNAP : celle-ci sont endurantes, persistantes dans le temps et ne sont pas modifiées en tant qu'entité. Ce sont les propriétés de celle-ci qui peuvent évoluer, mais celle-ci garde leur cohérence (ex : Une ville, un individu). Les secondes, les entités SPAN (perdurantes) prennent en considération le temps par des évènements et des processus, à savoir que l'entité admet un début, une fin et une suite d'évènements. Ici, l'intérêt est placé d'avantage sur la trajectoire de l'objet dans l'espace. Pour Livet(2010) la notion d'événement se focalise sur le changement d'état de l'entité spatiale et la notion de processus aux causes entrainant les modifications de l'entité, que ce soit les caractéristiques spatiale, attributaires ou relationnelle de l'entité géographique.

Ces deux types d'entités admettent cependant une évolutivité. Ces évolutions dans le temps décrivent des processus spatio-temporels (Claramunt and Thériault, 1995). Ceux-ci décrivent premièrement l'évolution des entités seules : les changements d'état (apparition ou disparition de l'entité) ou leur maintien dans un temps donné (stabilité). Ces processus amènent également des transformations de ces entités : par expansion (augmentation de la surface de l'objet), contraction (diminution de la surface de l'objet), déformation (changement de frome de l'objet mais conservation

de l'aire de la surface), déplacement (modification de la place de l'objet dans l'espace) et rotation par changement d'angle de l'objet dans l'espace.

Ces objets peuvent être considérés et modélisés différemment au sein d'un modèle spatial. Ruas et Sanders(2015) distinguent quatre types d'espace supports pour les objets géographiques en fonction des objectifs même de la modélisation : l'espace peut être un support à une configuration d'objets et se modifier en fonction de l'apparition, modification et disparition d'objets, il peut également être un support fixe dans lequel s'inscrit des trajectoires d'objets mobiles, un support dans lequel se sont les interactions d'objets dans le temps qui sont décrits (flux entre les parties de l'espace) ou être un espace maillés ou les subdivisons de l'espace évolue dans le temps. Dans une approche orienté-objet, c'est cependant la seconde, qui est le plus souvent utilisé.

2.2. Simulation d'objets spatio-temporels via système multi agent

Deux types d'approches sont possibles afin d'explorer les dynamiques de l'espace : une approche statistique, basée sur la mise en évidence de similarité entre les différents objets spatio-temporels et l'approche agent, focalisé sur les interactions existantes entre les agents entre eux et l'environnement partagé.

Ces deux approches ont des objectifs différents : dans le premier, l'approche statistique, l'objectif du modèle est de mettre au point un modèle reproduisant les faits observés dans la nature, cela demande alors de comparer empiriquement le modèle à des données existantes. Dans le second, l'intêret est principalement porté sur la mise en place de règles qui va permettre au modèle de reproduire au mieux des mécanismes existants pour arriver à une présentation simplifiée du réel.

Cette approche agent a pour objectif non pas l'identification des variables déterminantes d'un problème mais la compréhension des mécanismes à l'origine de l'émergence du phénomène observé. Le principe de la modélisation à base d'agents est de modéliser des systèmes complexes en adoptant une approche bottom-up par une modélisation centrée sur les individus. Un agent est une entité qui a ses propres objectifs et des capacités dans un environnement partagé (Ferber, 1997). Les systèmes multi-agents sont spatialement explicites, à savoir que les agents évoluent dans un environnement spatialisé. Les agents ont un emplacement dans l'environnement, et les systèmes à base d'agents sont adaptés à la modélisation spatiale et à la simulation. Selon Pumain(2003), les systèmes multi-agents sont 3 atouts majeurs de la géographie: démontrer le rôle des acteurs individuels dans les changements globaux et observer les transformations des territoires et l'adaptation des territoires du fait des interactions socio-économiques existantes.

L'objectif d'un tel système est de permettre de modéliser les perturbations ainsi que les navires et analyser leurs interactions au travers d'un environnement de simulation permettant l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime.

3. Une démarche de simulation de la vulnérabilité du réseau maritime

Cette démarche de modélisation se base sur des scénarios représentant l'évolutivité d'une perturbation spatio-temporelle au sein de l'espace maritime. Ces scénarios peuvent être modélisés sous forme d'objets spatio-temporels ayant une spatialité, une temporalité ainsi qu'une influence sur l'accessibilité du fait de son intensité sur les navires. Pour définir ces scénarios il convient en premier lieu d'expliciter et formaliser les perturbations comme un objet spatio-temporel.

3.1. Définition des perturbations comme trajectoire spatio-temporelle

Une perturbation peut être formalisée comme objet spatio-temporel à partir de deux caractéristiques spatiales : un centroïde et une extension spatiale, ainsi qu'une caractéristique temporelle, sa durée et enfin une caractéristique d'intensité via son impact sur l'accessibilité à l'espace pour un navire donné. Ces 4 axes sont représentés sur la figure suivante :

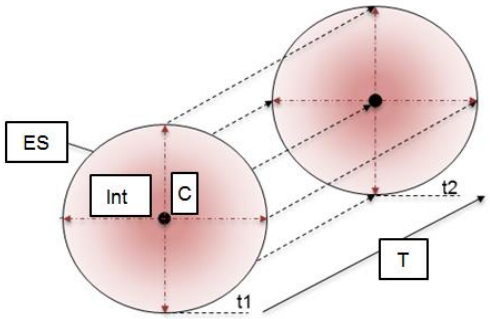


FIGURE *1. Caractéristiques d'une perturbation comme objet spatio-temporel*

Centroïde(C) : le centroïde est le centre de la perturbation, ayant un niveau d'impact sur l'accessibilité. Il peut rendre compte d'un centroïde unique (point – ex : un iceberg), mais peut également être de forme linéaire voire polygonale dans la mesure où la forme de la perturbation n'admet pas de centroïde unique (ex : un champ de glace en Arctique). La définition d'un centroïde est donc en partie question de l'échelle dont on observe la perturbation.

Temporalité(T) : la temporalité se définit comme la durée de la perturbation. Dans le cadre d'un pas de temps non contenu, c'est l'ensemble des pas de temps nécessaires à la manifestation de la perturbation. La temporalité peut être

persistante, périodique ou unique. Si elle est persistante cela signifie que la perturbation n'a pas de fin à partir de son commencement. Elle est périodique si elle admet un début, une fin mais qu'elle peut malgré tout survenir à nouveau. Enfin, elle peut être unique, commencer et finir sans que son existence implique qu'elle se déclenche de nouveau.

Extension spatiale(ES) : l'extension spatiale de l'objet correspond à la zone totale d'influence à partir de la localisation du centroïde de la perturbation. L'extension spatiale peut prendre plusieurs formes en fonction de la dynamique spatiale de la perturbation. Certaines perturbations n'ont cependant pas d'extension et peuvent être uniquement formalisées spatialement à partir du centroïde.

Intensité(Int) : L'intensité définit la répartition spatiale de l'intensité de la perturbation sur l'accessibilité à l'espace des navires. Celui-ci peut n'être qu'une singularité, à savoir, être uniquement compris dans le centroïde. L'impact peut également être homogène sur l'ensemble de l'extension spatiale. Enfin, il peut également être inégalement réparti : soit être décroissant ou décroissant à partir du centroïde, ou n'avoir pas de logique linéaire.

Les perturbations peuvent ensuite avoir des évolutions distinctes en fonction de ces caractéristiques spatio-temporelles. A partir de la typologie de Claramunt et al (1995) quatre catégories de dynamiques spatiales peuvent être distingués pour les : premièrement, les perturbations statiques qui ne connaissent pas de dynamique et n'évoluent pas dans le temps. Elles peuvent toutefois être persistantes, ou bien admettre un début ou une fin. Deuxièmement, les perturbations en déplacement : elles admettent un déplacement du centroïde pendant la durée de vie de la perturbation. Troisièmement, les perturbations en expansion/rétraction correspondant aux perturbations qui ont un centroïde qui d'admet pas de translation dans l'espace mais leur extension spatiale évolue au cours du temps. Et enfin, les perturbations en déplacement et diffusion : ces perturbations se diffusent et se déplacent également dans l'espace. A partir de ces critères une perturbation peut être définie par une fonction générique permettant de définir une perturbation à partir d'une trajectoire spatio-temporelle: **P(Pos,T,C,Int,SE).** L'exemple suivant sert de démonstration :

TABLE 1. Exemple d'une trajectoire de perturbation spatio-temporelle

Pos	T	C	ES	Int
1	10	A11	4	-8
2	10	E9	3	-6
3	10	G4	2	-4
4	20	K2	1	-2

Celle-ci décrit alors un déplacement, ainsi qu'une rétraction de la perturbation. Elle peut être visualisée au travers d'une grille, utilisée comme espace support à la perturbation (Figure 2) :

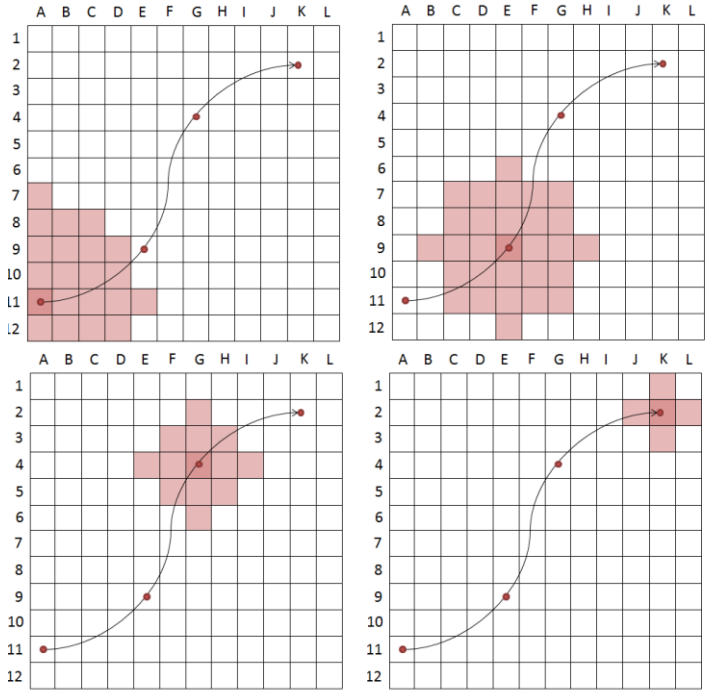


FIGURE *2. Représentation spatiale de la perturbation pour chaque pas de temps*

3.2 Définition des comportements spatiaux des navires

Ces perturbations ayant un impact sur l'accessibilité à l'espace, il est nécessaire de formaliser les comportements spatiaux des navires en fonction de l'accessibilité afin d'évaluer l'impact sur la formation du réseau maritime. La formalisation du réseau par l'accessibilité à l'espace nécessite deux étapes : premièrement évaluer les flux

entre les différents ports et deuxièmement définir les comportements spatiaux à adopter en fonction du niveau d'accessibilité. La première étape consiste ainsi à placer entre eux les ports. La distance entre les ports est importante car permet de calculer les voyages à effectuer. A partir d'un modèle gravitaire il est possible de déterminer pour chaque voyage une origine et une destination à effectuer. La seconde étape est de déterminer des logiques de déplacement pour les navires dans la structure spatiale afin de déterminer les trajectoires, et donc la structure géométrique des liens du réseau. Un comportement spatial peut être défini par un objectif (un lieu à atteindre) et un chemin pour rejoindre ce lieu, en fonction de l'accessibilité du territoire. Plusieurs mesures de distance peuvent être utilisées pour définir le comportement spatial des navires. Premièrement, la distance topologique. Celle-ci correspond au nombre de cellules qu'un navire doit traverser pour atteindre l'objectif de destination. Mais d'autres mesures de distances permettent de prendre en considération le niveau d'accessibilité et de pondéré le comportement spatial des navires en fonction des perturbations : la distance absolue pondérée et la distance absolue relative. La première correspond au chemin ayant la meilleure accessibilité globale, en tenant compte de la somme de tous les endroits traversés dans la matrice d'accessibilité. Pour un navire, cela signifie que le choix du chemin le plus accessible est entre sa position réelle dans la matrice et la destination à atteindre. La seconde construit des chemins en fonction de l'accessibilité moyenne des chemins au sein de accessible, ce type de chemin peut rallonger fortement la distance topologique. L'ensemble des distances pouvant être utilisés par les navires est représentés dans l'exemple suivant (Figure. 3) :

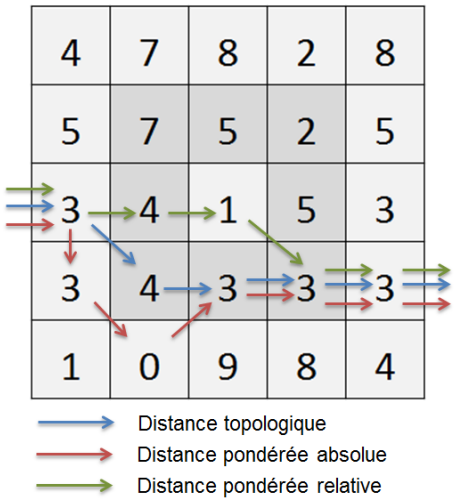


FIGURE *3. Différents comportements spatiaux en fonction du niveau d'accessibilité au travers d'un espace maillé*

La sélection de la distance pour le comportement spatial dépend de la capacité des navires et de l'espace maritime. En effet, chaque distance est spécifique et calcule une possibilité de déplacement en fonction de l'environnement. La première distance, topologique, mesure le chemin le plus court en fonction de la distance euclidienne dans la matrice (ce qui ne fonctionne pas en cas de distance de Von Numann ou de Moore). La seconde, la distance pondérée absolue, est utilisé pour la prise en compte de l'effet de accessibilité dans l'espace sur le comportement spatial et donc de mesurer le plus court chemin temporel. La dernière, la distance relative pondérée peut être utilisée dans des cas imprévisibles comme les perturbations.

3.3 Formalisation du système de simulation des risques en mer

Ces différents composants forment un modèle pour la simulation du réseau maritime en fonction des perturbations spatio-temporelles. Les perturbations peuvent être déclenchées par l'utilisateur afin de tester des scénarios et évaluer leur impact sur le réseau maritime. Pour formaliser le modèle, un diagramme des différentes classes objets du modèle peut être fait. Pour cela nous avons utilisé un diagramme de classe UML afin de préciser la nature spatio-temporel des éléments du modèle :

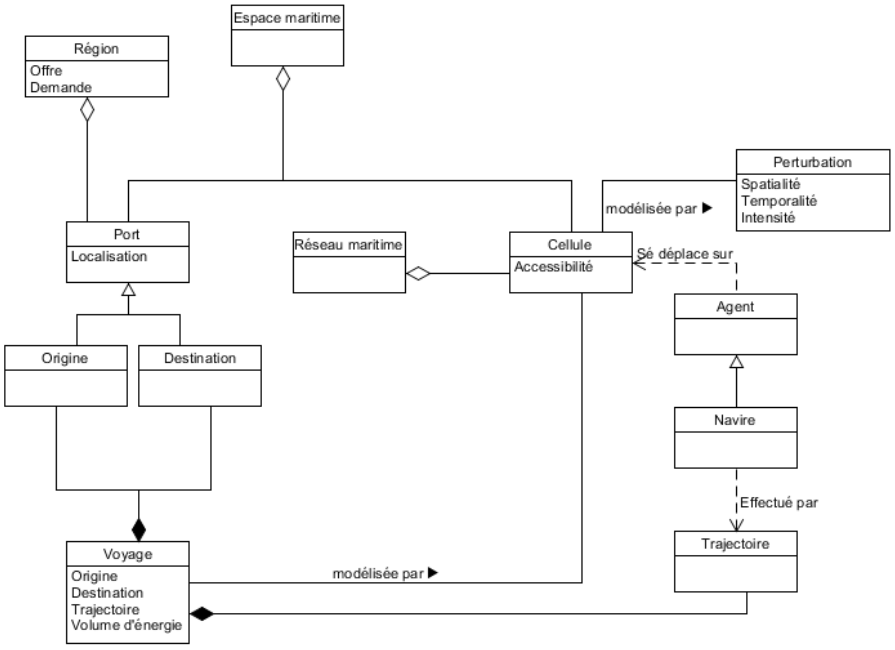


FIGURE *4. Diagramme de classe de l'ensemble du modèle*

Les différents composants du modèle sont définis de la manière suivante :

TABLE 2. Composants du modèle de simulation

Composant du modèle	**Description**
Espace maritime	Il correspond au médiateur spatial, à savoir l'ensemble de l'espace pouvant être utilisé à des fins de transport.
Région	Les régions correspondent à l'ensemble des Etats du monde ayant un niveau d'offre et de demande en biens et service nécessitant un échange par voie maritime.
Port	Localisés à l'interface entre l'espace maritime et l'espace terrestre, les ports sont les portes d'entrée et de sortie du médiateur spatial. Ils délimitent ainsi le comportement spatial des navires dans l'espace maritime.
Voyage	Un voyage est la réalisation d'un échange à l'intérieur du médiateur spatial. C'est un objet spatio-temporel borné par une origine, une trajectoire déterminé par l'accessibilité et une destination.
Réseau	Le réseau maritime représente l'ensemble des voyages effectués dans l'espace maritime. Il est défini typologiquement par les origines et destinations de ces voyages et géométriquement par les trajectoires spatio-temporelles des voyages.
Cellule	Subdivision de l'espace correspondant à une zone d'égale accessibilité dans l'espace.
Perturbation	Scénarios des aléas testés par l'utilisateur afin de mesurer l'impact d'une perturbation sur le réseau maritime.

L'ensemble de ces éléments forment ainsi un modèle pour la simulation de la vulnérabilité du réseau maritime face à un risque de perturbation. En fonction des scénarios de perturbations, il est possible de mesurer l'impact de celle-ci à partir des modifications que celle-ci entrainent sur la formation du réseau maritime et sa réorganisation en fonction des perturbations.

4. Conclusion

Cet article décrit l'élaboration d'une méthodologie pour la de la vulnérabilité du réseau de transport maritime. Celle-ci repose sur la notion d'accessibilité, centrale dans la relation existante entre l'espace et la vulnérabilité. Cette vulnérabilité est mesurée via la formalisation de scénarios de perturbations spatio-temporelles. Ces scénarios permettent de simuler ainsi le comportement des navires et donc l'émergence de structures du réseau liées aux risques maritimes.

Pour formaliser ce réseau, un modèle conceptuel de données spatiales est utilisé pour décrire les composantes et le fonctionnement du système. Ce modèle permet de

simuler l'effet des pertes d'accessibilité dues aux risques sur les comportements spatiaux des navires. Cette modélisation est construite en plusieurs étapes : la modélisation de l'espace comme support aux interactions des navires et perturbation, la modélisation du réseau à partir de l'emplacement des ports et des trajectoires des navires et la modélisation des comportements des navires et la modélisation spatio-temporelle des perturbations. Ce modèle sera ensuite simuler sur un outil de simulation multi-agent tel que NetLogo. A partir des simulations réalisées, des indices et des indicateurs pourront être mis en place pour évaluer la vulnérabilité du réseau maritime et être testé sur des espaces réels pour analyser les comportements des navires dans les zones maritimes les plus sensibles.

Bibliographie

Berdica, K., Mattsson, L.-G., 2007. Vulnerability: A Model-Based Case Study of the Road Network in Stockholm, in: Murray, A.T., Grubesic, T.H. (Eds.), Critical Infrastructure. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 81–106.

Berle, Ø., Asbjørnslett, B.E., Rice, J.B., 2011. Formal Vulnerability Assessment of a maritime transportation system. Reliab. Eng. Syst. Saf. 96, 696–705. doi:10.1016/j.ress.2010.12.011

Claramunt, C., Thériault, M., 1995. Managing Time in GIS An Event-Oriented Approach, in: Clifford, J., Tuzhilin, A. (Eds.), Recent Advances in Temporal Databases. Springer London, London, pp. 23–42.

Elliott, M., Cutts, N.D., Trono, A., 2014. A typology of marine and estuarine hazards and risks as vectors of change: A review for vulnerable coasts and their management. Ocean Coast. Manag. 93, 88–99. doi:10.1016/j.ocecoaman.2014.03.014

Ferber, J., 1997. Les systèmes multi-agents: un aperçu général. Tech. Sci. Inform. 16.

Gleyze, J.-F., 2005. La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques.

Grenon, P., Smith, B., 2004. SNAP and SPAN: Towards Dynamic Spatial Ontology. Spat. Cogn. Comput. 4, 69–104. doi:10.1207/s15427633scc0401_5

Livet, P., Muller, J.-P., Phan, D., Sanders, L., 2010. Ontology, a Mediator for Agent-Based Modeling in Social Science. J. Artif. Soc. Soc. Simul. 13. doi:10.18564/jasss.1538

Mathian, H., Sanders, L., 2014. Objets géographiques et processus de changement: approches spatio-temporelles.

Murray, A.T., Grubesic, T.H., 2007. Overview of reliability and vulnerability in critical infrastructure, in: Critical Infrastructure. Springer, pp. 1–8.

Niemeier, D.A., 1997. Accessibility: an evaluation using consumer welfare. Transportation 24, 377–396.

Parrain, C., 2012. La haute mer : un espace aux frontières de la recherche géographique. EchoGéo. doi:10.4000/echogeo.12929

Peuquet, D.J., 1994. It's About Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems. Ann. Assoc. Am. Geogr. 84, 441–461. doi:10.1111/j.1467-8306.1994.tb01869.x

Pumain, D., 2003. Une approche de la complexité en géographie. Géocarrefour 78, 25–31. doi:10.4000/geocarrefour.75

Rodrigue, J.-P., Comtois, C., Slack, B. (Eds.), 2013. The geography of transport systems, 3. ed. ed. Routledge, London.

Ruas, A., Sanders, L., 2015. Regards croisés sur la modélisation des dynamiques spatiales. Rev. Int. Géomat. 25, 275–300. doi:10.3166/rig.25.275-300

Taylor, M.A.P., Susilawati, 2012. Remoteness and accessibility in the vulnerability analysis of regional road networks. Transp. Res. Part Policy Pract. 46, 761–771. doi:10.1016/j.tra.2012.02.008

Veyret, Y., Reghezza, M., 2005. Aléas et risques dans l'analyse géographique. Ann. Mines 61–89.

Vigarié, A., 1983. Les tendances d'évolution des transports maritimes (1955-1985). Ann. Géographie 92, 53–72. doi:10.3406/geo.1983.20168

Zavitsas, K., 2012. The vulnerability of the petroleum supply chain. Imperial College London.