

Formalisation d'un système de simulation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime

Martin Tanguy

▶ **To cite this version:**

Martin Tanguy. Formalisation d'un système de simulation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime. Risques. Université Paris sciences et lettres, 2017. Français. NNT : 2017PSLEM065 . tel-02020165

HAL Id: tel-02020165
https://pastel.hal.science/tel-02020165

Submitted on 15 Feb 2019

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.

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à MINES ParisTech

Formalisation d'un système de simulation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime

Ecole doctorale n°432

SCIENCES DES METIERS DE L'INGENIEUR

Spécialité SCIENCES ET GENIE DES ACTIVITES A RISQUES

COMPOSITION DU JURY :

M. Didier JOSSELIN
Université d'Avignon, Président du jury

M. Christophe CLARAMUNT
Arts et Métiers ParisTech, Rapporteur

M. Tullio TANZI
TELECOM ParisTech, Rapporteur

Mme. Claire LAGESSE
Université de Franche-Comté,
Examinateur

M. Eric RIGAUD
MINES ParisTech, Examinateur

M. Aldo NAPOLI
MINES ParisTech, Examinateur

Soutenue par Martin **TANGUY**
le 30 novembre 2017

Dirigée par **Aldo NAPOLI**

MINES ParisTech | PSL

Remerciements

Premièrement, je tiens à remercier l'ensemble des rapporteurs et examinateurs du comité de thèse d'avoir accepté d'être membre du jury, et dont les commentaires, sans nul doute, constructifs et éclairés, m'aideront à terminer cette aventure que représente désormais ces 3 années de thèse. Merci à vous par avance.

Je tiens également à remercier particulièrement Aldo Napoli, pour l'exigence et l'écoute dont il a fait preuve durant ces 3 années de thèse. J'ai bien conscience que l'encadrement de mes trois années de doctorat ont dû demander beaucoup de patience. Même si cela n'a pas toujours été facile à accepter, je suis aujourd'hui très heureux d'avoir été poussé vers le haut et d'avoir finalement accompli ce travail. En regardant en arrière, j'estime la chance que j'ai eu de me confronter, de me remettre en cause et de progresser sans cesse durant tout le processus de thèse. Un grand merci pour ces trois années d'encadrement.

Je tiens à remercier le laboratoire et son directeur Franck Guarnieri pour avoir fondé cet environnement unique et interdisciplinaire qu'est le Centre de recherche sur les Risques et les Crises(CRC). En effet, ces trois années furent également l'occasion d'échanger et d'enrichir mes connaissances dans une multitude de domaines variés, et de comprendre, qu'en tant que doctorant, nous étions tous liés par une même chose : la méthode scientifique. Je remercie particulièrement Valérie Sanseverino-Godfrin et aujourd'hui Eric Rigaud pour la direction de l'école doctorale. Je tiens à remercier chaleureusement mes homologues doctorants, avec qui j'ai passé de beaux moments pendant ces trois années. Enfin, je remercie Maysam Zoor, avec qui ce fut un plaisir de travailler à l'implémentation du modèle sous AnyLogic.

Enfin, mes derniers mots vont à mes proches, qui, malgré la distance, m'ont toujours soutenu pendant mes années azuréennes.

Merci à vous.

Sommaire

Remerciements **1**

Sommaire **3**

Introduction **11**

Contexte 11

La mondialisation comme vecteur des échanges 11

La maritimisation comme processus socio-économique 11

Territorialisation des espaces maritimes 13

Une activité de transport générant des risques 13

Un outil pour la planification maritime 14

Problématique et enjeux de recherche 15

Hypothèse de recherche 15

Questions de recherche 16

Cadre de travail 19

Déroulement du travail 19

Plan de la thèse 19

Chapitre 1 : Risques en mer et vulnérabilité du réseau maritime **21**

1.1 L'étude du risque : définitions et concepts 21

1.1.1 Le concept de risque à travers les disciplines 21

1.1.2 Le risque en sciences géographiques 22

1.1.2.1 Notion d'aléa 23

1.1.2.2 Notion de vulnérabilité 23

1.2 Réseau maritime et risques associés 24

1.2.1 Le concept de réseau maritime 24

1.2.1.1 Réseau de transport et espace 25

1.2.1.2 Les réseaux vaguement définis : principes de structuration 26

1.2.1.3 Les ports comme infrastructure des réseaux maritimes 27

1.2.1.4 Les espaces maritimes : support des routes maritimes 27
1.2.1.5 Barrières absolues et relatives.....28
1.2.1.6 Navigation et routes maritimes 29
1.2.1.7 Structure du réseau maritime : la relation coût-distance.....29
1.2.2 Aléas maritimes 33
1.2.3 Vulnérabilité en mer 36
1.2.4 Evaluation des risques maritimes 36
1.2.4.1 Analyse et évaluation des risques 36
1.2.4.2 Modélisations existantes pour l'évaluation de la vulnérabilité.....37
1.2.5 Systèmes existants pour l'évaluation de la vulnérabilité.....40
1.3 Vulnérabilité des réseaux de transport 41
1.3.1 Risque et réseaux de transport 42
1.3.1.1 Vulnérabilité : définition dans le cadre d'un réseau 42
1.3.1.2 Les enjeux du réseau : performance et efficacité.....43
1.3.2 Evaluation de la performance d'un réseau : concepts clés 44
1.3.2.1 La robustesse.....44
1.3.2.2 La fiabilité.....44
1.3.3 La vulnérabilité et fonction de la structure.....45
1.3.3.1 La vulnérabilité connective et d'accès.....45
1.3.3.2 Aléas et perturbations 45
1.3.4 De la vulnérabilité à l'accessibilité.....47
1.4. Accessibilité et barrières 48
1.4.1 Concept d'accessibilité 49
1.4.2 Typologie des accessibilités 49
1.4.3 Barrières et perturbations.....51
1.4.3.1 Barrières et fonctions 53
1.4.3.2 Barrières et espace : absolues, relatives ou arbitraires.....53

1.4.4 Barrières et réseaux 54
1.4.4.1 Barrières physiques 54
1.4.4.2 Barrières de congestion 54
1.4.4.3 Barrières fiscales 54
1.4.4.4 Barrières institutionnelles 54
1.4.4.5 Barrières techniques 55
1.4.4.6 Barrières culturelles, de langage et d'information 55
Conclusion du chapitre 1 55
Chapitre 2 : Modélisation et simulation des réseaux de transport et de l'environnement maritime 57
2.1. Formalisation des réseaux 57
2.1.1 Modélisation des réseaux via théorie des graphes 57
2.1.1.1 Définition des graphes 58
2.1.1.2 Formalisation mathématique 58
2.1.2 Propriétés spatiales des graphes 58
2.1.2.1 Propriétés topologiques 58
2.1.2.2 Propriétés vectorielles et géométriques 61
2.1.2.3 Propriétés relationnelles : les logiques de déplacement 62
2.1.2.4 Formalisation algébrique des réseaux 62
2.1.3 Propriétés globales des graphes 63
2.1.3.1 Usage des graphes pour la modélisation des réseaux de transport 64
2.1.3.2 Typologie des réseaux par niveau de structuration : les graphes spatiaux 64
2.1.4 Modélisation du réseau maritime par la théorie des graphes 64
2.1.4.1 Prise en compte de l'espace dans les modélisations 65
2.1.4.2 Sources d'information pour la modélisation des réseaux de transport maritime 67
2.2 Mesures des propriétés des graphes spatiaux 68
2.2.1 Les notions de centralité et d'accessibilité dans un graphe spatial 68

2.2.2 Mesures principales 68
2.2.2.1 Mesures locales 68
2.2.2.2 Mesures globales 69
2.2.3 Evaluation des réseaux par les mesures existantes 70
2.3.3.1 Les perturbations du réseau 71
2.3.3.2 Mesures pour la vulnérabilité structurelle des réseaux 72
2.3 Formalisation de l'espace maritime 73
2.3.1 Frontières et continuum 73
2.3.2 L'espace dans la modélisation 74
2.3.3 Structures spatiales 74
2.3.3.1 Avantages et inconvénients de chaque structure 76
2.3.3.2 Un espace topologique régulier : la grille carrée 77
2.3.3.3 Grille et réseau 78
2.3.4 Formalisation d'objet spatio-temporelle 79
2.3.4.1 Définition d'un objet spatio-temporel 80
2.3.4.2 Dynamiques spatio-temporelles 81
2.4 Simulation de la vulnérabilité des réseaux de transport 82
2.4.1 Systèmes complexes et simulation 82
2.4.2 Définitions de la complexité 82
2.4.2.1 Notion d'auto-organisation 83
2.4.2.2 Notion d'émergence 83
2.4.2.3 Définition des systèmes complexes 84
2.4.3 Simulation et espace 84
2.4.3.1 Systèmes de simulation spatialement explicites 84
2.4.3.2 Usage de la complexité dans les sciences géomatiques 85
2.4.4 Systèmes multi-agents 86
2.4.4.1 Paradigme multi-agent 86

2.4.4.2 Agent 87
2.4.4.3 Systèmes multi-agents 88
2.4.5 Langage de modélisation des systèmes multi-agents 89
2.4.5.1 UML 90
2.4.5.2 AML 92
2.4.5.3 ODD 93
2.4.6 Outils de simulation multi-agents 95
2.4.6.1 NetLogo 96
2.4.6.2 AnyLogic 96
Conclusion du chapitre 2 97
Chapitre 3 : Proposition d'une démarche de modélisation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime 101
3.1 Développement d'un système de simulation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime 101
3.1.1 Un outil pour la planification de l'espace maritime 101
3.1.2 Principe du système de simulation 102
3.1.3 Choix méthodologiques 103
3.1.3.1 Déterminisme et Complexité 103
3.1.3.2 Système multi-agents et automate cellulaire 104
3.2 Choix de modélisation 105
3.2.1 Choix d'une modélisation de l'espace 105
3.2.2 Choix d'une modélisation des échanges 106
3.3 Description du système de simulation 107
3.3.1 Vue d'ensemble 107
3.3.2 Conception et design du modèle 110
3.3.3 Détails de fonctionnement 111
3.4 Formalisation du système de simulation 112
3.4.1 Modélisation générale du système de simulation 112

3.4.2 Modélisation des données....113
3.4.2.1 Modélisation des classes du territoire maritime....113
3.4.2.2 Modélisation du transport et des navires....114
3.4.2.3 Modélisation des perturbations....117
3.4.2.4 Modélisation du réseau maritime....118
3.4.3 Modélisation du processus de simulation....120
3.4.3.1 Fonctionnement et processus du système....120
3.4.3.2 Fonctionnement et processus des perturbations....124
3.5 Indicateurs de performance du système de simulation....127
3.5.1 La nécessité d'indicateurs spécifiques....127
3.5.2 Indicateurs liés à l'accessibilité à l'espace....127
3.6 Implémentation du système de simulation....138
3.6.1 Modélisation de l'espace de simulation....138
3.6.2 Modélisation des routes maritimes et des navires....141
3.6.3 Implémentation des perturbations....144
3.6.3.1 Perturbations économiques....144
3.6.3.2 Perturbations spatiales....145
3.6.3.3 Perturbations spatio-temporelles....146
Conclusion du chapitre 3....147
Chapitre 4 : Utilisation du système de simulation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime....149
4.1 Objectifs du système de simulation....149
4.2 Elaboration des scénarios de simulation....153
4.3 Résultats et analyse des réseaux obtenus....158
4.3.1 Visualisation des réseaux issus du système de simulation....158
4.3.2 Evaluation de la vulnérabilité du réseau aux perturbations....163
4.3.2.1 Identifier les centralités d'un réseau en espace ouvert (Indice 1)....164

4.3.2.2 Identifier les zones les plus fréquentées dans l'espace (Indice 2) 165
4.3.2.3 Connaitre les routes les plus impactées par une perturbation donnée (Indice 3) 166
4.3.2.4 Mesurer l'écart de sollicitation entre le réseau optimal et le réseau perturbé (Indice 4).....167
4.3.2.5 Observer la réorganisation du réseau dans un espace perturbé (Indice 5).....168
4.3.2.6 Connaitre à posteriori les impacts des perturbations en mer sur les ports (Indice 6) 169
4.3.2.7 Evaluer la perte de performance globale du réseau maritime (Indices 7 et 8).170
4.4 Analyse des scénarios par type de paramètre.....171
4.4.1 Par type de perturbation.....171
4.4.2 Par la dimension de l'espace maritime.....172
4.4.3 Par nombre de ports.....173
4.4.4 Par taille de la structure spatiale.....174
4.4.5 Par niveau d'accessibilité à l'espace 174
4.5 Discussion et voies d'amélioration de la plateforme 178
4.5.1 Améliorations 179
4.5.1.1 Différentiation des agents 179
4.5.1.2 Différentiation des cellules maritimes 179
4.5.1.3 Importer des structures spatiales existantes 179
4.5.1.4 Créer une grille adaptative avec un quadtree.....180
4.5.2 Apport de la démarche.....180
4.5.2.1 Apport à la planification des espaces maritimes.....180
4.5.2.2 Apport à la modélisation des réseaux maritimes 180
Conclusion du chapitre 4.....181
Conclusion 182
Bilan de la thèse 182
Perspectives.....183

Table des figures 184

Bibliographie 188

Introduction

L'objectif de cette thèse est d'évaluer la vulnérabilité du réseau maritime. En cela, l'enjeu principal de cette recherche est de mesurer la performance d'un réseau de transport, à travers les propriétés spatiales et temporelles de celui-ci. Cette introduction présente dans un premier lieu le contexte de la recherche : l'essor du transport maritime et les risques associés à l'activité de transport dans l'espace maritime. Les principes et les spécificités de ceux-ci permettront de formuler des hypothèses et une problématique de recherche.

Contexte

Les risques maritimes sont étroitement corrélés à l'usage de la mer comme espace d'échange et de transaction. Cette introduction a pour but de définir et de décrire cet espace, l'usage à des fins de transport et les risques liés dans cet espace spécifique. Ainsi, nous évoquerons ici les mécanismes amenant à l'essor du transport maritime, l'impact sur les territoires littoraux mais également océanique et enfin les risques associés à l'activité de transport en mer.

La mondialisation comme vecteur des échanges

Afin de comprendre l'apparition d'un réseau maritime à l'échelle mondiale, il convient de s'intéresser au processus géographique, social et économique qui a modifié la structure des échanges dans le monde : la mondialisation. La mondialisation est définie par Dollfus (1997) comme « *l'échange généralisé entre les différentes parties de la planète* », où l'espace mondial est « *l'espace de transaction de l'humanité* ». Le lien entre ce phénomène socio-économique et l'essor du transport maritime est étroit. En effet, les échanges de biens manufacturés ou d'énergie (pétrole et gaz) sont principalement effectués par voie maritime. Plus encore, les transports ont eu un rôle déterminant dans le développement de civilisations (Grèce antique, Empire romain, Chine) et dans la défense nationale (Empire britannique). Socialement, politiquement ou économiquement, le transport crée un lien entre les diverses régions du monde et façonne les activités et les cultures. Parmi les différents modes de transport, le transport maritime a eu un rôle primordial dans la construction de la société actuelle. De nos jours, la maritimisation a amplifié ce rôle, et les espaces maritimes sont devenus une composante indispensable de la mondialisation, formant un réseau mondial de transport maritime.

La maritimisation comme processus socio-économique

Vigarié (1983) définit la maritimisation comme un processus de dépendance économique croissant vers la mer. Le terme est apparu dans la littérature dans les années 1970, en même temps que le phénomène qu'il décrit. La dépendance se définit par des biens et services

consommés ou produits sur le territoire, entrant ou sortant par la mer. Les Etats ont connu une forte maritimisation lors des dernières décennies du 20ème siècle. Pour cela, ces Etats se sont équipés d'une flotte commerciale et d'infrastructures portuaires. La maritimisation concerne différents secteurs de l'économie. Le processus de maritimisation s'explique par la conjonction de deux phénomènes. Il y a d'un côté, le phénomène de mondialisation, processus d'accroissement des échanges mondiaux, et de l'autre, l'évolution des différentes techniques, en transport et en logistique permettant d'exploiter efficacement la mer comme un espace d'échange et de transaction. La mondialisation s'appuie avant tout sur la doctrine libérale qui a permis le développement du libre-échange. Cela a produit une spécialisation économique des territoires, et donc une interdépendance entre eux. C'est en effet l'émergence de nouvelles économies, notamment celles d'Asie du Sud-Est qui a formé des zones de consommation et de production différentes à l'échelle mondiale. De 1980 à 2011 le transit maritime entre les pays d'Asie du Sud Est et le reste du monde a augmenté de 800%. Le processus de mondialisation induit ainsi un changement d'échelle pour les échanges dans le monde, ce qui a très nettement avantagé le commerce par voie maritime. En effet, au-delà d'une distance de 1 500 km, l'échange maritime devient le plus avantageux du fait du coût de transport plus faible (Rodrigue, Comtois, et Slack 2013) que ce soit à l'unité (gigantisme des navires) qu'au voyage (prix du carburant moindre, pas d'infrastructures propres à construire et à entretenir). Si les coûts fixes sont plus importants (construction de navires et ports), ils deviennent plus rentables à mesure que le transport s'effectue sur une distance importante.

Ce coût plus bas a notamment été rendu possible pour plusieurs raisons : la capacité de stockage importante, liée à l'augmentation de la taille des navires, et la standardisation via la conteneurisation, qui a permis des économies d'échelle sur le transport ainsi qu'une interopérabilité. La demande des régions industrialisées (Europe, Amérique du Nord, Asie de l'Est) a progressivement augmenté lors des dernières décennies, ce qui a amplifié le trafic maritime. Ces routes, dépendantes de la localisation de l'offre et de la demande, sont susceptibles de changer. Louchet (2014) démontre que les routes maritimes de l'énergie évoluent dans le temps. Les routes, principalement régionales dans un premier temps, ont progressivement formé un réseau de transport maritime mondial. Depuis 1979, la mondialisation des échanges et la configuration des routes n'a pas connu de transformations majeures mais Lasserre (2010) montre la possibilité d'une nouvelle route en Arctique liée à la fonte de la banquise boréale. Le Yong Sheng a été le premier porte-conteneurs à prendre cette route en 2013.

Territorialisation des espaces maritimes

Ce processus de maritimisation a eu un impact sur les espaces maritimes. Cette utilisation croissante de l'espace comme espace de transition et d'exploitation a eu pour conséquence une territorialisation des espaces maritimes. Trouillet (2006) utilise la notion de mer-territoire, c'est-à-dire d'un espace *« approprié, exploité et géré par les sociétés, malgré certaines spécificités* ». Di Méo (2008) explicite la notion de territoire en distinguant ses deux composantes : une infrastructure et une superstructure. L'infrastructure fait référence aux aspects concrets et matériels des territoires. Elle se compose d'une instance géographique, via la construction d'espace concret (les ports, structures offshores…) et l'instance économique qui implique une organisation spatiale des transits et de l'exploitation dans le territoire. Ces instances sont gérées par la superstructure, composée d'une instance idéelle (la représentation du territoire), et d'une instance politique et juridique impliquant un pouvoir sur l'espace considéré, qu'il soit international (Montego Bay) ou national (ZEE, mers territoriales, etc…). Ce phénomène de territorialisation des espaces maritimes a progressivement complexifié ces espaces. L'espace océanique est donc un « territoire d'émergence » (Ginet 2012) c'est-à-dire un territoire où l'apparition d'une instance politique permet l'appropriation et donc la gestion de ce territoire.

Une activité de transport générant des risques

Le transport maritime connaît beaucoup de risques en raison de la spécificité de l'espace maritime : celui-ci est défini comme vaste et « *hypermobile* », à savoir qu'il est constamment en modification (Parrain 2012), cet espace connait ainsi peu de structures fixes. Du fait de la maritimisation, ces risques connaissent un enjeu grandissant entrainant la mise en place de programmes d'actions, de surveillances réglementaires, spécifiques par les Etats (Papa 2013). Cependant, cela ne permet pas d'éviter de nombreux risques liés à l'activité de transport en mer comme sur les littoraux.

Elliott, Cutts, et Trono (2014) proposent une typologie des risques en mer qu'ils soient de nature anthropologique ou naturelle. Ces risques sont répartis en 14 catégories en fonction des causes d'aléas. Ces risques ont des caractéristiques spatio-temporelles différentes. 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. L'ensemble de ces risques provoquent des accidents en mer, Soares et Teixeira (2001) dressent une liste des types d'accidents par type de navire. Le risque d'incendie/explosion par année est le plus important pour les pétroliers avec un risque de 1/1000, devant les échouements et les collisions.

Ces risques ont un impact sur le réseau en provoquant des perturbations et produisent un coût supplémentaire pour le transport en raison du temps supplémentaire et de la distance nécessaire pour atteindre le port de destination. En effet, Berle, Asbjørnslett, et Rice (2011) définissent le principal enjeu face aux risques maritimes pour le transport comme la recherche de maximisation de profit face aux différents risques de l'espace maritime.

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 l'heure de la perte d'accessibilité qui augmentent la vulnérabilité 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, et plus spécifiquement la vulnérabilité des réseaux. Cette vulnérabilité est liée aux possibilités relationnelles des réseaux, leur accessibilité, à savoir la capacité d'un lieu à pouvoir être rejoint (Rodrigue *et al.*, 2013). En effet, l'espace maritime est un médiateur spatial et son efficacité est liée à la notion d'accessibilité (Gleyze 2005). Pour mesurer cette accessibilité, l'utilisation d'algorithmes de plus courts chemins est choisie afin d'évaluer l'accessibilité pour les navires en fonction des barrières maritimes (par exemple les récifs, les zones obligatoires, les détroits) liées aux risques.

Un outil pour la planification maritime

L'augmentation de l'usage de la mer pour les activités économiques intensifie ces risques et demande aux Etats une réflexion sur la planification de ces espaces. La planification des espaces maritimes, à savoir une gestion intégrée des activités maritimes est progressivement mise en place dans les Etats afin de répondre à plusieurs objectifs (Union Européenne, 2017) :

- Réduire les conflits entre secteurs et de créer des synergies entre les différentes activités.
- Encourager les investissements, en introduisant de la prévisibilité, de la transparence et des règles plus claires, ce qui pourra contribuer à stimuler le développement des sources

et des réseaux d'énergies renouvelables, à créer des zones marines protégées et à faciliter les investissements dans le secteur maritime.

- Renforcer la coordination entre les administrations de chaque pays, grâce à l'utilisation d'un instrument unique destiné à équilibrer le développement d'un éventail d'activités maritimes, ce qui sera plus simple et moins coûteux.
- Accroître la coopération transfrontalière entre les pays de l'UE, en ce qui concerne les câbles, les oléoducs et gazoducs, les routes maritimes, les installations de production d'énergie éolienne…
- Protéger l'environnement en déterminant de manière précoce l'impact des utilisations multiples de l'espace et les perspectives qu'elles offrent.

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs recommandations et réglementations ont été mises en place, principalement dans une optique environnementale. Cependant, le transport maritime est confronté à des bouleversements, demandant une gestion spécifique du transport dans le cadre de la planification. L'objectif sera ainsi de mettre en place un outil permettant d'appréhender le réseau maritime face à ces changements.

Problématique et enjeux de recherche

L'ensemble de ces risques constitue un enjeu majeur pour l'économie mondiale, comme pour la sécurité des équipages garantissant ces échanges. Cette partie développe, à partir des éléments de contexte présentés, une problématique de recherche liée à la discipline investie, à savoir la géographie des transports. Cette problématique est liée à la modélisation d'un réseau de transport dans un espace spécifique : l'espace maritime. En effet, cela suppose une modélisation spécifique de l'espace, du réseau, et de mettre en place une méthodologie prenant en compte ces spécificités et de trouver des indicateurs appropriés à cette modélisation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime.

Hypothèse de recherche

Ainsi, l'hypothèse de recherche réside dans l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime à partir d'une modélisation du réseau en fonction des possibilités offertes par l'espace. C'est-à-dire que l'accessibilité à l'espace peut permettre d'évaluer la performance d'un réseau à l'intérieur d'un espace ouvert comme l'espace maritime. Cela présuppose ainsi que le réseau n'est pas une entité propre, mais une agrégation d'entités individuelles, que sont les ports et les navires, et que ceux-ci créent les routes en fonction de leur navigation dans l'espace maritime.

Ainsi le réseau et ses propriétés spatiales sont une conséquence du déplacement des navires obtenue à travers une simulation du réseau maritime.

Questions de recherche

La problématique générale est d'élaborer une méthodologie afin d'aborder la question de la vulnérabilité du réseau maritime. Pour cela, l'enjeu de cette recherche peut se décliner en plusieurs points distincts :

1. **La formalisation du réseau et de l'espace maritime comme objet de recherche** : Quelles sont les spécificités spatiales (topologiques, géométriques) du réseau ? Comment le modéliser ? Comment transformer les parcours des navires en un objet géographique ? Comment prendre en compte les interactions entre les parcours et l'environnement ?

Pour cela, il est nécessaire de comprendre la nature même du réseau maritime en tant qu'objet d'étude. Rodrigue *et al.,* (2013) distinguent les réseaux strictement définis liés à l'infrastructure (routier, ferroviaire) et les réseaux vaguement définis (aérien, maritime). En cela, la nature du réseau maritime est spécifique.

La question est ainsi de savoir comment formaliser un réseau n'étant pas lié à ces contraintes spatiales, et donc théoriquement libre. Cette question de la formalisation du réseau est d'ailleurs cruciale tant l'observation des voyages effectués en mer suggère une organisation des trajets en réseau, et les logiques de déplacement viennent pallier à cette absence d'infrastructure afin de reconstruire une structure cohérente en réseau. En effet, dans le cadre du réseau maritime, c'est le fonctionnement (le choix des utilisateurs de la structure spatiale) qui explique la structure du réseau, c'est donc à travers les effets du risque sur le territoire maritime, et les contraintes que ceux-ci exercent sur le fonctionnement du réseau que peut être appréhendée la modélisation du réseau maritime.

La topologie du réseau est définie par les ports, raffineries et plateformes offshores, mais il est géométriquement défini par les trajectoires empruntées par les navires. Ces logiques sont avant tout réglementaires et économiques : réglementaires puisque la liberté de mouvement est en soi réglementée (zones interdites, couloir de navigation) et économiques (logique de du chemin le moins cher, du chemin le plus sécurisé). L'ensemble de ces facteurs peuvent être résumés via la notion d'accessibilité. Celle-ci se définit comme la capacité d'un lieu à être rejoint (Rodrigue *et al.*, 2013).

Ainsi du fait de cette nature spécifique, formaliser le réseau maritime en tant qu'objet géographique pose problème. Deux types de modélisation de systèmes de transport peuvent être distingués : les premiers sont liés à la structure du système, les seconds à leur fonctionnement. Les premiers types de modèles s'intéressent au réseau en tant que médiateur spatial, et peuvent être modélisés sous forme de graphes, matrices du plus court chemin, voire par géo-morphométrie pour les réseaux hydrographiques (Beguin et Thomas 1997). Les seconds sont modélisés par l'utilisation de systèmes multi-agents (Ducruet et Lugo 2013) qui peuvent par la suite être agrégés et formaliser un réseau.

Ainsi, cela amène à réfléchir sur une méthode pour agréger les routes en fonction des possibilités de déplacements dans le médiateur spatial surfacique et cela afin d'obtenir un réseau renseignant les lieux visités ainsi que les longueurs spatiales et temporelles entre les nœuds.

2. L'évaluation de la vulnérabilité d'un réseau de transport en espace ouvert : du fait de sa nature géographique propre, comment appréhender la vulnérabilité du réseau ? Comment mesurer celle-ci compte tenu des spécificités ?

Si la notion de vulnérabilité en géographie admet plusieurs définitions, l'intérêt est ici porté sur la notion de vulnérabilité dans le cadre d'un réseau de transport. L'objectif d'un réseau de transport est de relier efficacement des lieux entre eux de manière à optimiser son utilisation. Ainsi la vulnérabilité d'un réseau de transport s'intéresse aux impacts socio-économiques possibles liés à des pertes d'efficacité des réseaux de transports (Taylor et Susilawati 2012). La question de la vulnérabilité de transport est donc très liée à sa relation avec les perturbations. Berdica et Mattsson (2007) abordent la question de la vulnérabilité en considérant, pour un réseau de transport donné, la susceptibilité qu'ont divers incidents à entrainer une réduction considérable de la maintenabilité du niveau de service.

Ce niveau de service est exprimé à travers des pertes d'efficacité et de performance du réseau. Taylor et Susilawati (2012) montrent les mesures existantes qui reposent sur le concept d'accessibilité à l'espace, qui se définit comme la facilité d'atteindre la destination désirée dans un réseau donné (Niemeier 1997).

Pour cela plusieurs indicateurs existent afin de quantifier l'efficacité du réseau via la théorie des graphes : des indices liés aux composants (nœuds ou chemins) et les indices liés à la structure globale du réseau. Au niveau local, des indices comme le degré de centralité (positionnement du composant à l'intérieur du réseau), d'intermédiarité (positionnement du

composant en fonction des plus courts chemin du réseau) ou l'index de Shimbel (distance intégrale pour relier l'ensemble des composants) sont utilisés pour quantifier le degré de vulnérabilité d'un composant, alors que les indices de niveau global sont utilisés pour mesurer les propriétés spatiales globales de la structure du réseau face à une perturbation, événements entrainant une perte d'efficacité de la structure.

La question principale est ainsi de savoir comment adapter ces mesures à la spécificité spatiale du réseau maritime, la structure de l'espace maritime étant composée de ports modélisés par des nœuds et de routes modélisées par des liens à l'intérieur d'un espace libre. La mise en place d'indices spécifiques est donc nécessaire du fait que le médiateur spatial est une surface et non un réseau linéaire.

3. La modélisation spatio-temporelle de perturbations dans l'espace maritime : comment modéliser les perturbations dans le modèle ? Comment les intégrer dans le modèle ? Comment prendre en compte l'impact des aléas sur les navires ?

La question des perturbations dans le réseau maritime pose également question. 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 de déviation dans l'espace maritime, la prise en compte des perturbations demande une modélisation spécifique de celle-ci.

Dans la mesure où le médiateur spatial admet une nature spatiale surfacique, 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.

Pour comprendre l'influence de ces perturbations, il convient de se questionner sur l'aspect spatio-temporel propre à l'espace maritime, en effet, celles-ci présentent 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 d'une simulation, il est ainsi nécessaire de mettre en place un modèle générique de perturbations spatio-temporelles capable de s'adapter aux spécificités de chaque type de risque maritime. Cela permettra de comprendre comment la spatialité de chaque type de perturbation impacte le réseau maritime.

Cadre de travail

Ce travail se place à la frontière de plusieurs aspects de la géographie :

- Thématiquement, la recherche se situe entre la géographie des transports et la géographie des risques.
- Méthodologiquement, ce travail est à la frontière de la géographie quantitative et de l'informatique et s'appuie sur l'utilisation de la théorie des graphes, de la modélisation spatio-temporelle et de la simulation à base d'agent.

Déroulement du travail

Ces trois années de thèse ont été réparties de la manière suivante : la première année a été l'occasion de s'intéresser principalement à la théorie des graphes et à la notion de réseau et de perturbation. La deuxième année s'est orientée vers la recherche d'une méthodologie pour l'évaluation de la vulnérabilité. Celle-ci est basée sur les systèmes multi-agents afin de faire évoluer les propriétés spatiales des graphes en fonction des différentes configurations de l'espace. Enfin la troisième année a permis la rédaction du manuscrit de thèse ainsi que la réalisation du prototype permettant de valider le modèle théorique effectué.

Plan de la thèse

Cette thèse est découpée en 4 chapitres : le premier chapitre consiste en un état de l'art thématique sur la vulnérabilité des réseaux de transport, et plus particulièrement des réseaux de transport maritime. Le second est un état de l'art sur la modélisation des réseaux de transport, des perturbations et de l'espace maritime ainsi que sur les systèmes de simulation et leurs usages pour la mesure de la vulnérabilité. Le troisième chapitre s'intéresse à la formalisation et à la modélisation du système de simulation de la vulnérabilité. La quatrième et dernière partie s'intéresse à l'expérimentation de scénarios simulés pour l'évaluation de la vulnérabilité.

Chapitre 1 : Risques en mer et vulnérabilité du réseau maritime

Ce chapitre est un état de l'art thématique sur les différentes notions essentielles pour le travail de thèse, à savoir les notions de vulnérabilité et de réseau, centrales dans ce travail. Elle présente ainsi le concept de risque et les notions associées (aléas, enjeux, vulnérabilité) indispensable à la définition de la problématique. Ces notions sont utilisées différemment en fonction des disciplines investies. L'objectif majeur de cette partie est de retenir une définition du risque et, à partir de celle-ci, définir un procédé pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime.

1.1 L'étude du risque : définitions et concepts

Cette partie s'intéresse à la notion de risque, particulièrement dans le cadre d'étude en géographie et en sciences de l'information géographique. En effet, *risque* est un mot valise rassemblant un nombre important de définitions diverses, utilisées différemment selon les disciplines. Ainsi, nous verrons dans un premier temps le concept de risque dans la littérature scientifique en général, puis spécifiquement en géographie.

1.1.1 Le concept de risque à travers les disciplines

La notion de risque est multiple et admet plusieurs définitions en fonction de la discipline étudiée. Nous nous intéresserons ainsi à la notion de risque à travers le prisme la géographie. Aven (2012) démontre la versatilité de la notion de risque, et le manque de clarté avec laquelle est utilisée la notion dans différentes disciplines que ce soit dans les sciences de l'ingénieur ou les sciences humaines. Ainsi, Aven (2012) dresse une typologie des différentes considérations du risque dans la littérature indépendamment de leurs disciplines :

R=EV	Le risque en tant que valeur de perte	Le risque est évalué comme une perte, il correspond à la somme des enjeux multipliés par la probabilité d'occurrence de la perte. Cette définition du risque est la plus ancienne utilisée dans les études sur le risque.
R=P	Le risque en tant que probabilité d'un événement indésirable	Le risque est la probabilité d'un dommage ou d'une perte. Cette catégorie d'étude se base uniquement sur la possibilité ou probabilité qu'un événement défini comme risqué advienne.
R=OU	Le risque en tant qu'incertitude objective	Principalement utilisé en économie quantitative, en finance et pour les calculs des sociétés d'assurance. Le risque est ainsi défini par la somme plus ou moins certaine de différentes variables incertaines.

R=U	Le risque en tant qu'incertitude	Le risque est lié à la non-connaissance de l'information sur l'objet étudié, notamment sur des événements provoquant un coût, une perte ou un dommage.
R=PO	Le risque en tant que possibilité/potentialité de perte	Le risque est la possibilité qu'un événement advienne. Il peut aussi être une déviation imprévue par rapport à une situation préétablie. Ce sont les conséquences négatives d'un événement non-voulu.
R=P&C	Le risque en tant que probabilité et conséquence d'un scénario	Cela nécessite au préalable d'identifier les scénarios de risque ayant un effet sur l'objet étudié. C'est la combinaison d'aléas mesurés par probabilité liées aux caractéristiques d'une situation au-delà des caractéristiques d'une organisation.
R=C	Le risque en tant qu'événement ou conséquence	Le risque représente une conséquence incertaine d'un événement sur les activités et la vie humaine.
R=C&U	Le risque en tant que conséquence/dommages et sévérité de l'incertitude.	Le risque est la conjonction de l'incertitude et du dommage éventuel. Il est égal à la combinaison des événements/conséquences d'une activité liée à un niveau d'incertitude.
R=ISO	Le risque en tant qu'effet de l'incertitude sur un objectif.	Cette catégorie regroupe des disciplines, et donc des méthodologies de mesure du risque très différentes.

1.1.2 Le risque en sciences géographiques

Les catégories ci-dessus doivent être mêlées à la caractérisation du risque en géographie. En effet, le risque en géographie est généralement considéré à l'aide de la formule Risque = Aléa x Vulnérabilité. La notion de probabilité se retrouve ainsi dans l'aléa, et la notion de conséquence dans celle de vulnérabilité. En effet, l'aléa correspond à la fréquence de l'événement considéré ou sa probabilité d'occurrence et la vulnérabilité à la gravité des conséquences sur l'ensemble des entités exposées (Gleyze, 2005). Ces risques sont traditionnellement catégorisés par la courbe de Farmer, qui est définie par deux axes : l'intensité de l'aléa et sa fréquence.

1.1.2.1 Notion d'aléa

En géographie, la notion d'aléa est héritée de la géographique physique. Elle décrit tous les événements, souvent naturels, pouvant affecter une zone. Si le risque est parallèlement étudié dans différents domaines, il est cependant nécessaire de préciser l'apport de la géographie à l'étude des risques. En effet, l'approche géographique permet d'apporter une dimension spatiale, temporelle et multi-scalaire à l'étude des risques. Ainsi, ce n'est pas tant la nature des risques qui est étudiée que leurs caractéristiques spatiales (taille, forme, positionnement, durée, etc.). Cela permet de caractériser le risque, pas uniquement par sa nature, sa fréquence ou son influence sur les enjeux, mais par sa répartition spatiale et temporelle sur un enjeu donné et permet d'aboutir à une spatialisation du risque qu'il s'agisse des aléas ou des conséquences de ceux-ci sur un enjeu donné.

L'approche majoritairement retenue en géographie est celle d'un phénomène physique ou humain agissant sur un territoire donné. Ainsi, le territoire est généralement considéré comme un espace support à l'apparition et à la disparition d'aléas. Cependant, certains auteurs (November *et al.*, 2010) présentent le territoire non pas comme espace support mais comme un espace intégrant le risque comme élément caractéristique. Le risque est donc une composante de ces espaces parmi d'autres caractéristiques objectives ou subjectives. Cela suppose qu'il y ait une différentiation spatiale des risques, et que ceux-ci ne se répartissent pas nécessairement de la même manière. La notion d'aléa correspond à la partie déterministe et objective du risque (November *et al.,* 2002) et se trouve souvent exprimée d'une manière probabiliste, à savoir la fréquence d'apparition d'un phénomène dans un territoire donné. L'aléa correspond à l'incertitude du déroulement et de la probabilité d'un phénomène catastrophique (Gleyze, 2005). Plus explicitement, l'aléa est décrit comme la nature, l'intensité et la probabilité d'occurrence d'un phénomène.

1.1.2.2 Notion de vulnérabilité

La vulnérabilité se définit de deux façons complémentaires (Veyret et Reghezza 2005) : par une approche dite *impact* et une approche dite *sociale*. La première, principalement utilisée dans les sciences de l'ingénieur, cherche à déterminer le degré d'endommagement des enjeux, qui se définit par la valeur des entités menacées (Leone *et al.*, 1996). Cela permet de déduire l'impact physique de l'aléa sur l'enjeu. La seconde approche met en avant les protections mises en place par la société. Cette approche cherche à comprendre les causes ainsi que les capacités de réponse des acteurs face à une situation à risque. Ces approches ne s'opposent pas : l'aspect quantitatif permet la compréhension à posteriori des causes et des capacités de réponse d'une

société face à la catastrophe. Dans le cadre de cette recherche, la caractérisation du risque du réseau maritime revient d'abord à définir les enjeux de l'entité exposée.

1.2 Réseau maritime et risques associés

Ainsi, avant de considérer la vulnérabilité, il est nécessaire de définir l'objet du risque, à savoir le réseau maritime et les aléas pouvant l'affecter. En effet, comme décrit précédemment, la vulnérabilité ne peut être comprise sans définir l'objet considéré et les aléas susceptibles de générer des dommages sur l'objet du risque, à savoir le réseau maritime.

Un réseau, au sens générique, peut se définir comme *« Ensemble formé de lignes ou d'éléments qui communiquent ou s'entrecroisent »* (Larousse). Laurent Chapiron, sur le portail francophone Hypergéo définit quant à lui le réseau comme « *un ensemble d'éléments matériels, les infrastructures, et immatériels, électromagnétiques (ondes) ou informationnels, assurant la mise en relation de différents lieux d'un territoire et des entités qui les occupent*. »

Ainsi cette partie définit et décrit dans un premier temps le réseau maritime en tant qu'objet de recherche et dans un second temps les risques résultants de l'environnement maritime.

1.2.1 Le concept de réseau maritime

Le réseau maritime, comme objet d'étude, est un concept relativement récent et peu étudié. Ducruet (2016) remarque que le terme de recherche *maritime network* est très faiblement représenté dans la littérature scientifique en 2014 en comparaison aux autres types de réseau. En juillet 2014, le terme *maritime network* présente le moins d'occurrence toutes les disciplines confondues dans les principaux moteurs de recherche scientifiques :

Terme saisi	Science Direct	Scopus	Google Scholar
Maritime network	151	134	1970
Airline network	954	2476	6670
Road network	17522	29293	390000
Railway network	3010	5078	46300

Cette notion de réseau, n'est pas non plus clairement établie dans le domaine maritime, puisque *maritime network* arrive derrière *maritime transport*, *maritime trafic* et *maritime route*. Ainsi, la notion de réseau maritime n'est que peu abordée, que ce soit dans les études sur les réseaux ou dans les études du domaine maritime (Lemarchand, 2000).

Ainsi il convient de s'interroger sur la nature et les spécificités de ce réseau. En effet, du fait de certaines particularités, aborder le réseau maritime comme un objet d'étude demande de définir le réseau maritime et ses spécificités.

1.2.1.1 Réseau de transport et espace

Un réseau est défini comme « *Ensemble formé de lignes ou d'éléments qui communiquent ou s'entrecroisent* » (Larousse). Ainsi, le rôle d'un réseau de transport est de relier différentes parties de l'espace entre elles, et de permettre à des individus ou des véhicules de se déplacer de la manière la plus optimale possible. La vulnérabilité des réseaux de transport est liée à l'enjeu de ceux-ci, à savoir, leurs capacités à maintenir une performance des déplacements pour garantir la possibilité des échanges. Ainsi, la vulnérabilité d'un réseau de transport est liée à sa capacité à maintenir des échanges dans sa structure.

Une typologie des réseaux de transport en fonction de leur inscription spatiale a été proposée par Rodrigue *et al.* (2013) : les réseaux peuvent être strictement définis et délimités, vaguement définis et délimités, ou immatériels.

Dans un réseau strictement défini et délimité, l'espace occupé par le réseau de transport est strictement réservé pour l'usage du transport et peut être identifié sur une carte. Une appropriation de cet espace à des fins de transport peut être établie, la structure du réseau est dépendante de l'infrastructure. C'est le cas des réseaux routiers et ferroviaires qui sont des réseaux d'infrastructure. Ces réseaux d'infrastructure (routes, rails) sont nécessairement planaires, à savoir que les liens ne peuvent pas se croiser dans l'espace. En effet, en cas de croisement de route, un nœud est ajouté à l'intersection pour décrire la structure de la voierie.

Dans les réseaux vaguement définis et délimités, comme le sont les réseaux maritimes et aériens, l'espace peut être partagé par plusieurs activités, il n'y a pas d'appropriation de l'espace, seulement des droits de passages. Les infrastructures concernent exclusivement les zones de départ et d'arrivée (ports, aéroports). Ainsi les nœuds sont inscrits dans l'espace (positionnement, pondération). Dans la formalisation des réseaux de transport aériens et maritimes, les liens sont généralement les parcours réalisés ou les parcours possibles entre deux nœuds. Plusieurs types d'information peuvent être pris en compte dans la trajectoire : la longueur, la forme ainsi qu'une pondération en fonction des volumes échangés (passagers, marchandises).

Enfin, certains réseaux, comme les réseaux de communication, sont immatériels (Wi-fi, téléphone satellite…) et n'ont pas de spatialité en dehors de la localisation, de l'émetteur et du récepteur de la communication. Il est possible d'attribuer des informations géométriques (localisation, longueur, forme) aux liens du graphe mais ceux-ci correspondent à des aires autour de l'émetteur.

Le réseau de transport peut ainsi se définir en fonction des infrastructures (l'aspect physique du réseau) composées dans le cadre du réseau maritime, des ports et de l'ensemble des parcours des navires dans l'espace maritime.

1.2.1.2 Les réseaux vaguement définis : principes de structuration

Nous avons vu que Rodrigue *et al.* (2013) définit trois niveaux de structuration en fonction des infrastructures matérielles des réseaux : les réseaux strictement définis, les réseaux vaguement définis et les réseaux non définis.

Ainsi un réseau de transport se compose de lieux, définis par leurs localisations, et de routes, permettant de relier ces différents lieux. Cependant, la localisation de ces lieux et ces routes ne sont pas dues au hasard et plusieurs facteurs expliquent la forme des réseaux en fonction de la structure de l'espace :

- **Le coût** : Le lien entre coût et espace est lié à la distance. Plus celle-ci est importante, plus le coût de transport est théoriquement élevé. Ainsi, les ports sont construits et utilisés en fonction de leurs positionnements relatifs entre eux. La distribution des activités est liée au facteur de distance afin de minimiser les coûts de transport, qu'ils soient unitaires ou collectifs.
- **L'accessibilité** : Tout lieu dans l'espace a un niveau d'accessibilité, en fonction de son positionnement relatif mais également de divers facteurs économiques, sociaux et politiques. Ainsi le niveau d'accessibilité fluctue en fonction de chaque lieu, et donc de chaque port.
- **L'agglomération** : La localisation des ports s'explique également par l'avantage spécifique d'un lieu, que ce soit son placement ou ses ressources. L'agglomération d'un port ou d'une activité s'explique également historiquement, et les ports existants et ayant eu une fonction importante subsistent et sont renforcés par l'ensemble des infrastructures opérationnelles pour le transport préalablement existantes.

1.2.1.3 Les ports comme infrastructure des réseaux maritimes

Les ports sont les uniques infrastructures sur lesquels repose le réseau de transport maritime. Ils sont à la fois les portes d'entrées et de sorties du réseau maritime. Ducruet et Notteboom (2012) définissent et énumèrent plusieurs critères qui expliquent le positionnement dans l'espace et le poids relatif de chaque port : les infrastructures physiques et techniques, les équipements, l'accessibilités aux hinterlands (arrière-pays), le raccordement aux réseaux terrestres, localisations géographiques vis-à-vis des routes maritimes, la productivité et coûts des ports, qualité et coûts des services portuaires, sécurité et sûreté des ports, réputation des ports. Ces critères expliquent ainsi le positionnement géographique et le poids de chaque port au sein du réseau. Les ports sont à la fois complémentaires et en compétition, ce qui modifie nécessairement la structure des réseaux, ainsi le positionnement d'un port s'explique par les caractéristiques et la position des autres ports auquel il est relié. Ces ports sont ainsi hiérarchisés entre eux (Hub, spoke). (Fig.1)

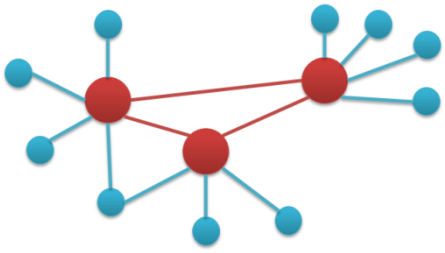


Figure 1. Organisation d'un réseau en hub (en rouge) et spoke (en bleu)

1.2.1.4 Les espaces maritimes : support des routes maritimes

Entre les ports, le réseau emprunte l'espace maritime, qui correspond à l'ensemble des mers et voies navigables. L'espace maritime n'admet pas de discontinuité à l'intérieur de son espace et donc l'espace maritime est totalement connexe. Cela signifie qu'au départ d'un port, il est possible de rejoindre théoriquement toutes les destinations possibles. Pour illustrer cette propriété de l'espace, Serret (2009) propose une cartographie représentant l'océan mondial entouré par les continents terrestres. (Fig. 2)



Figure 2. Planisphère déformé présentant la connexité de l'Océan Mondial (Serret, 2009)

Cependant, ce degré de liberté n'est que théorique, car en pratique des logiques de déplacements viennent structurer les routes maritimes. Premièrement, la réglementation existant dans certains passages entrave cette liberté d'usage. C'est le cas dans la Manche, ou des séparateurs de trafic viennent définir des routes maritimes dans les zones de navigation les plus denses. Deuxièmement, le transport représente un coût, et donc, une logique de déplacement basée sur la recherche de plus court chemin. Enfin, des contraintes physiques (récifs, formes des côtés, structures offshores) sont prises en compte pour la navigation.

Ainsi l'espace maritime, s'il est vaste, admet une structure pour la navigation. Cette structure est liée à des logiques de déplacements (plus court chemin, chemin le plus sûr, chemin de plus rapide) ainsi que des barrières qui exercent des contraintes sur la navigation.

1.2.1.5 Barrières absolues et relatives

Ces contraintes, géographiques, juridiques et économiques liées aux espaces maritimes se formalisent comme des barrières sur le réseau maritime, et expliquent ainsi la structure globale du réseau de transport maritime. Rodrigue *et al.* (2013) distingue deux types de barrières pour les réseaux de transports : les barrières absolues et relatives.

- Les barrières absolues ont pour effet d'empêcher tout mouvement au sein du réseau. Dans un réseau maritime, cela correspond à l'interface terre/mer, soit à la limite de l'espace maritime. En effet, l'interface terre/mer est une discontinuité, et donc se caractérise comme une limite infranchissable.
- Les barrières relatives réduisent et restreignent le degré de liberté de l'espace, et donc réduisent la connectivité du réseau. Elles influent ainsi sur les routes empruntées pour relier deux endroits du réseau. Elles correspondent aux caps, détroits, canaux, icebergs,

et tout élément influant sur la liberté d'usage de l'espace maritime. Les mauvaises conditions climatiques peuvent être ici définies comme des barrières relatives dynamiques.

A ces deux catégories s'ajoutent les barrières arbitraires. Celle-ci ont le même effet sur la navigation que les barrières relatives à la différence qu'elles sont réglementaires, et donc elles n'ont aucune existence physique (zones protégées, zones militaires, etc.).

1.2.1.6 Navigation et routes maritimes

Les éléments structurels décrits en amont (contraintes physiques, délimitations politiques et réglementaires, logiques de déplacement) permettent d'établir les routes maritimes, qui sont des couloirs de navigation dans lesquels la majeure partie des voyages effectués par les navires sont réalisés Plusieurs types de routes maritimes peuvent être distingués (Fig. 13). Celles-ci sont principalement liées à l'usage du réseau, et donc à la structure des flux à l'intérieur du réseau. 3 types d'organisations sont distingués par Rodrigue (2013) :

1. Les routes « port-à-port » : Ces routes correspondent à des trajets simples entre deux ports, généralement pour des matériaux spécifiques, entre leurs zones de production et de consommation.

2. Les routes pendulaires : Ces routes sont des trajets longs qui desservent plusieurs ports sur les façades maritimes. Spatialement, ces routes forment des boucles entre différents ports, généralement entre deux façades (Côte est américaine/Ouest européenne, Europe/Asie du sud-est, Asie de l'ouest/Façade ouest américaine). Ce type de route relie les différents spoke à leurs hubs respectifs.

3. Les routes autour du monde : Ces routes desservent en continu un nombre restreint de ports, les hubs de transbordements, qui relient ensuite les pôles secondaires (spoke). C'est donc des trajets longues distances entre les différents hubs mondiaux.

1.2.1.7 Structure du réseau maritime : la relation coût-distance

Comme décrit précédemment, la relation entre coût de transport et distance est étroite, et le choix de mode de transport, ainsi que les parcours dans le réseau sont effectués à partir d'un choix coût-distance.

Dans le cadre d'un réseau de transport ces déplacements sont optimisés afin de réduire au maximum le coût de transport. En effet, le transport représente en moyenne 10% du prix total

d'un bien, et optimiser les coûts de transport est l'enjeu économique majeur des sociétés de transport maritime.

Ces coûts de transports sont liés (Ducruet et Notteboom 2012) à plusieurs facteurs, notamment géographiques. Plus la distance de transport est grande et difficile à atteindre, plus le coût du transport en sera élevé. Les coûts du transport maritime est généralement moins important que les coûts de transports terrestres avec la distance. Cela s'explique par les économies d'échelles et les moindres contraintes physiques malgré un coût des terminaux (infrastructures de sports et navires) plus important. (Fig.3)

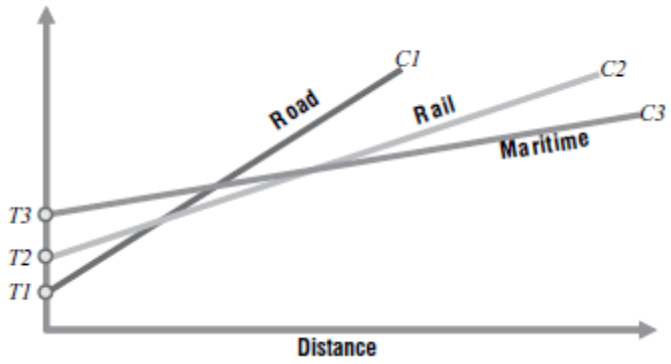


Figure 3. Relation Coût/Distance des différents modes de transport (Rodrigue *et al.*, 2013)

La relation entre la distance et le coût est appelée « friction » et reprend par analogie la définition connue dans les sciences physiques, à savoir une force de résistance relative qui va réduire la facilité à effectuer le déplacement. La friction s'exprime à travers une fonction coût-distance. Il existe 4 types de friction s'exprimant à travers la distance :

Aucun effet de distance : La distance n'a aucun effet sur le coût du transport. Cette catégorie est principalement représentée par les réseaux de communication ayant une nature immatérielle (ex : téléphone, Wifi).

Effet linéaire de distance : Les coûts de transports sont proportionnels à la distance. Certains coûts spécifiques sont linéaires, comme le coût du carburant. Beaucoup de modèles utilisent cette approche, ou le coût est égal à la distance de transport total. La fonction coût-distance est affine, en prenant en compte ou non les coûts fixes, en fonction de ce qui est étudié.

Effets non-linéaire de distance : Deux cas de figure sont possibles, soit l'augmentation de coût décroit avec la distance, et la fonction coût-distance est concave, soit il croit d'autant plus vite que la distance augmente, et la fonction est convexe. Dans le premier cas, la fonction coût-

distance est liée aux économies d'échelles, ou au mode de transport, comme c'est le cas pour le transport maritime et aérien. Dans le second cas, le voyage retour est effectué à vide après déchargement (navires, camions) ce qui augmente fortement le coût du voyage.

Chaine de transport multimodale : Le coût de transport n'est pas uniquement lié aux déplacements et la distance, mais également les coûts des terminaux (chargement, déchargement, maintenance, transbordements). Cette fonction peut être exprimée par une fonction affine par escalier.

D'autres éléments, annexes et connexes à la géographie, sont facteurs du coût de transport, parmi lesquels :

Elément	**Facteurs associés**
Géographie	Distance, accessibilité, physiographie
Type de produit	Format du packaging, poids, nature du produit (périssable)
Economies d'échelles	Taille des navires
Déséquilibres commerciaux	Blocus, relations diplomatiques
Infrastructure	Capacité d'accueil, limitations, conditions opérationnelles (Travailleurs, équipement disponible)
Mode	Capacité d'accueil, limitations, conditions opérationnelles (Travailleurs, équipement disponible)
Compétition et régulation	Tarifs, restrictions, péage, normes de sécurité.

La friction de l'espace a également un impact important sur le temps de transport, qui peut également servir à résumer l'information du coût du transport : plus le temps sera important plus le coût de transport le sera également. Il existe 5 paramètres temporels principaux à prendre en compte pour le temps dans un réseau de transport :

Temps de transport : C'est le temps de transport total entre l'origine et la destination du voyage, il est proportionnel à la distance et la vitesse de déplacement. Cette vitesse peut être

contrainte par des limitations, une vitesse maximale, on être contrainte par la vitesse maximale du véhicule.

Timing : La notion de timing fait référence aux dates spécifiques de départs et d'arrivées des voyages, avec une certaine flexibilité en fonction des modes de transport. En effet, le timing s'exprime différemment en fonction des modes de transport. Le transport aérien et ferroviaire possède une flexibilité très faible du fait de la capacité des terminaux. A l'inverse, le transport routier connait beaucoup d'effet de congestion, et la plage horaire d'arrivée est beaucoup plus ample que pour les autres modes.

Ordre de passage : De la même manière que le timing, l'ordre de passage est déterminant, notamment pour l'organisation du réseau de transport dans les terminaux. L'ordre de passage est important pour planifier la capacité des terminaux. En fonction des modes de transport, ceux-ci peuvent être planifiés des mois à l'avance ou être simplement basés sur le concept du « premier arrivé, premier servi ». Dans le cas du transport maritime, les dates d'arrivée des navires sont souvent prises plusieurs mois à l'avance.

Ponctualité : La ponctualité correspond à la capacité de garder un planning de voyage. C'est une déviation moyenne du temps en fonction de la date d'arrivée prévue. Plus la distance est longue, plus le voyage peut être potentiellement perturbé. La tolérance est d'autant plus grande que la distance entre l'origine et la destination est importante.

Fréquence : La fréquence est relative au nombre de départs dans une plage horaire spécifique. Cela peut être un nombre de départ par jour. Une fréquence haute signifie un nombre important de véhicules par jour, c'est le cas par exemple du transport routier. Dans le transport maritime, avec l'augmentation de la taille des navires, la fréquence tant à baisser et demeure moins crucial que le timing et l'ordre de passage dans la gestion des terminaux.

L'ensemble de ces facteurs temporels sont importants pour l'organisation et la performance générale d'un réseau de transport. Depuis 1976, la CNUCED définit plusieurs indicateurs (Fig. 4) pour la mesure de la performance économique des ports (Itoh, Merk, et Ducruet 2014) : les indicateurs peuvent être financiers ou opérationnels :

Indicateurs financiers	Indicateurs opérationnels
Tonnage travaillé, revenu d'occupation de poste d'amarrage par tonne de marchandises, revenu de transport de marchandises par tonne de marchandises, dépenses de main-d'œuvre, dépenses d'équipement par tonne de marchandises, contribution par tonne de marchandises, contribution totale.	Heure d'arrivée, temps d'attente, temps de service, temps de rotation, tonnage par navire, fraction du temps de stationnement des navires à quai, nombre de groupes utilisés par navire et par quart, tonnes par heure de navire au port, tonnes par heure de navire à quai, tonne par groupe d'heures.

Figure 4. Indicateurs pour la mesure de performance du réseau maritime (Itoh, Merk et Ducruet, 2014)

La bonne gestion du temps sur un réseau de transport est primordial pour la maitrise des coûts, afin d'assurer un service de transport optimal.

Ce coût de transport se divise en 3 parties :

Coût des terminaux : Ces coûts correspondent aux chargements, déchargements et transbordements dans les terminaux. Les coûts principaux à prendre en compte sont les coûts de chargement et déchargement dans les terminaux (ports) d'origine et de destination, et en effet ces coûts sont souvent irréductibles et sont obligatoirement comptabilisés. Ils correspondent ainsi à des coûts fixes, qui ne peuvent pas être optimisés par la distance.

Coût de ligne : Ces coûts sont fonction de la distance entre l'origine et la destination du voyage, mais également du coût total de la marchandise échangée. Ils incluent également des coûts annexes strictement linéaires à la distance comme le coût du travail du personnel opérant sur les navires, ainsi que le coût du carburant.

Coût du capital : Il s'agit des coûts matériels d'infrastructures (véhicules et terminaux). Il s'agit généralement de coûts importants mais exceptionnels, ces coûts sont non réguliers, liés à la maintenance et la rénovation des infrastructures de transports.

1.2.2 Aléas maritimes

L'objectif de cette partie est de décrire pour chaque composante du risque (aléa, vulnérabilité, enjeux) les spécificités des risques maritimes. Si le réseau maritime (l'enjeu) est celui d'un réseau, cet enjeu s'applique à un espace et une activité très spécifique : l'espace maritime et le transport. Ainsi, du fait de la spécificité de l'espace traversé et des moyens de transports et des techniques utilisées, les risques du transport en mer sont spécifiques. Cette partie présente les

différents types de risques existant en mer et spécifie leurs natures et conséquences sur le réseau maritime.

Les aléas sont ainsi des événements pouvant survenir dans l'espace maritime, qu'ils soient prédictibles ou non-prédictibles. L'aléa correspond à la nature du phénomène, son intensité et sa probabilité d'occurrence (Gleyze, 2005). Sa nature peut être exprimée à travers à la fois de ses caractéristiques spatio-temporelles et ses caractéristiques attributaires. Plusieurs typologies des « risques » sont faites dans la littérature, mais elles varient beaucoup en fonction de la définition même du risque. Certaines typologies concernent les aléas, d'autres la vulnérabilité, d'autres les causes.

Cependant il convient d'effectuer une typologie des aléas (externe et interne à l'activité de transport), des vulnérabilités (liées à la capacité même de l'activité). Ainsi, Eliott *et al.* (2014) distinguent 14 catégories de risques sur l'espace maritime et les littoraux :

Catégories	**Types**	**Exemples**
Submersions marines	Naturelle/Anthropique	Inondations, marées, El Nino
Perte de surfaces liée aux phénomènes naturels	Naturelle/Anthropique	Erosions liées aux mouvements marins.
Perte de surfaces liée aux activités humaines	Anthropique	Poldérisation, ajout d'ouvrages de défenses côtières.
Rupture de surface	Naturelle	Ecroulement de falaise
Dangers liés aux conditions météorologiques	Naturelle/Anthropique	Cyclones, tempêtes, submersions liées aux pluies.
Dangers liés aux conditions climatiques	Naturelle/Anthropique	Acidification des océans, montée du niveau marin.
Dangers tectoniques à court terme	Naturelle	Tsunamis, vagues scélérates.
Dangers tectoniques à long terme	Naturelle	Rebond isostatique.
Dangers biologiques microbiens	Anthropique	Pollutions des eaux de mers, rejet en mer des eaux usées.
Dangers biologiques macrobiens	Anthropique	OGM, espèces invasives, changements faunes marines.

Dangers liés aux technologies humaines	Anthropique	Infrastructures en mer, défense et urbanisation des zones côtières.
Dangers liés aux activités d'extractions	Anthropique	Effondrement des fonds marins, glissements de terrains, perte de biodiversité.
Pollutions chimiques aiguës	Anthropique	Marées noires, déballastages
Pollutions chimiques chroniques	Anthropique	Pollutions diffuses, plastiques en mer, déchets marins divers.

D'autres typologies existent comme la typologie de l'organisation des Nations-unis qui a listé un nombre de « menaces » existantes pour les activités dans l'espace maritime :

- Pollution intentionnelle, émission illégale
- La contrebande et le trafic de drogues illicites et de substances psychoactives
- La piraterie
- Vol à main armée
- Détournement du navire ou des personnes à bord
- Attaque terroriste
- L'utilisation du navire pour transporter ceux qui ont l'intention de causer un incident de sûreté et / ou leur équipement
- L'utilisation du navire lui-même comme arme ou comme un moyen de causer des dommages ou destructions
- Attaque nucléaire, biologique et chimique
- Blocage des entrées des ports, écluses, approches, etc.
- L'altération de la cargaison, du matériel ou des systèmes essentiels du navire ou des provisions de bord
- Prendre des otages
- Passagers clandestins
- Contrebande d'armes ou d'équipement.
- Trafic d'armes à feu illégal, leurs pièces, composants et munitions

- Pêche illégale

Ces typologies montrent la diversité des aléas en mer, en termes de cause, de spatialité et temporalité. L'ensemble de ces éléments hétérogènes pouvant avoir une influence sur le réseau maritime, sa performance et sa capacité à se maintenir face à ces événements.

1.2.3 Vulnérabilité en mer

Il est également possible de lister les différents éléments pouvant être considérés comme vulnérables pour une activité de transport en mer. Il convient de distinguer la vulnérabilité pour un navire, et la vulnérabilité pour le réseau. En effet, la notion de vulnérabilité implique un risque pour des enjeux spécifiques. Ces enjeux peuvent être catégorisés en 3 catégories principales, en fonction des enjeux considérés (Kristiansen 2005) :

- **Risques pour les vies humaines** : morts et blessures faites à l'équipage du fait de l'activité de transport.
- **Risques pour l'économie** : dommages matériels aux navires et aux ports, augmentation du prix du transport.
- **Risques pour l'environnement** : marées noires, accidents chimiques, pêches illégales, dommages pour les faunes et les flores marines et côtières.

Ces catégories sont autant liées aux aléas qu'à la vulnérabilité, c'est-à-dire des enjeux liés à l'activité. La vulnérabilité, plus spécifiquement dans le cadre d'un réseau de transport sera décrite dans les sections suivantes.

1.2.4 Evaluation des risques maritimes

Une grande majorité des travaux portant sur le risque maritime travaille sur la notion d'accident, voire plus spécifiquement sur celui de collision (avec d'autres navires ou l'environnement). Plus encore, certaines études s'intéressent à un risque spécifique : piraterie maritime, terrorisme, marées noires, etc. Enfin, un dernier groupe d'étude s'intéresse non pas au risque à l'échelle des navires, mais peu d'études s'intéressent au risque à l'échelle du réseau maritime, à savoir l'ensemble des navires et des infrastructures utilisées pour le transport maritime.

1.2.4.1 Analyse et évaluation des risques

Une confusion est généralement faite dans la littérature entre l'analyse du risque (*Risk Analysis*) et l'évaluation des risques (*Risk Assessment*). Cependant, la différence la plus admise est que l'évaluation des risques est considérée comme l'apport scientifique (proposition de concepts et de systèmes d'évaluations) de l'analyse du risque, qui comprend en plus de l'évaluation, la

gestion des risques (*Risk Management*). Cette recherche se focalise ainsi sur l'évaluation et non sur l'ensemble du processus d'analyse. La figure suivante permet de comprendre les différentes notions (Fig.5) :

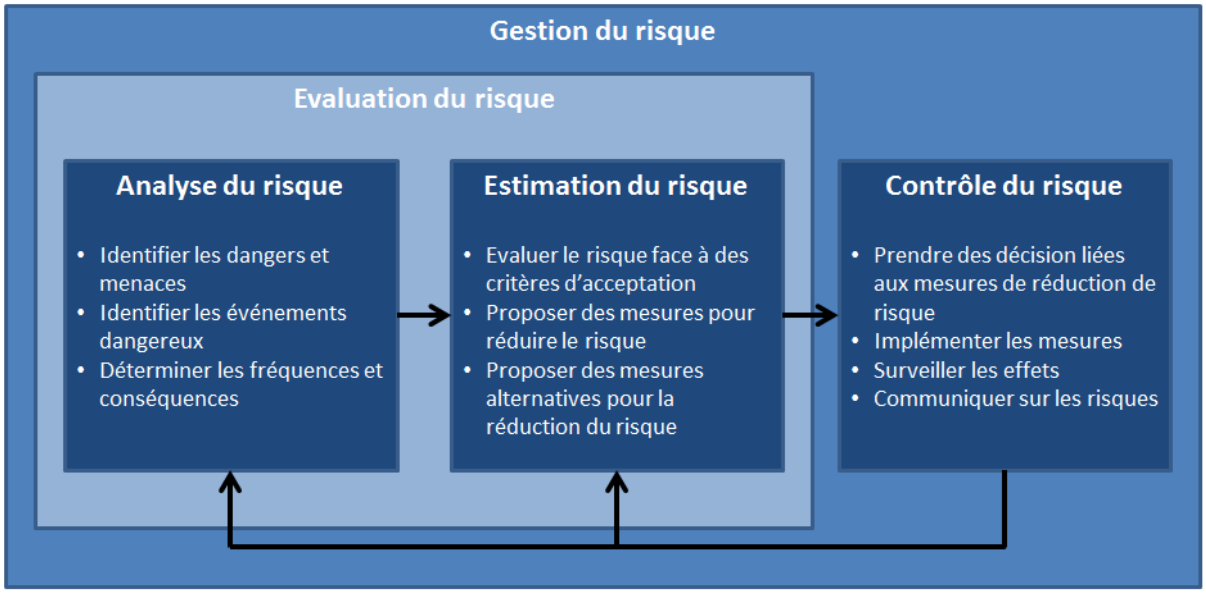


Figure 5. Différence entre gestion, évaluation et analyse des risques (d'après Rausand, 2011)

1.2.4.2 Modélisations existantes pour l'évaluation de la vulnérabilité

Goerlandt et Montewka (2015) procèdent à un état de l'art des différents modèles existants pour étudier le risque pour le transport maritime. Ils se basent sur la typologie proposée par Aven (2012). Leur état de l'art compare les méthodologies utilisées dans 58 études en les classifiant selon 6 approches scientifiques différentes :

- **Fortement réalistes** - Ces études considèrent le risque comme un attribut d'un système, et l'estimation se veut le plus réaliste possible. Le risque est uniquement pris en compte par des données dans un système. La finalité du modèle est donc liée à la modélisation du système. Ces modèles sont très généralement destinés à être des outils soit d'aide à la décision, soit de surveillance.
- **Modérément réalistes** - Très similaire à l'approche fortement réaliste, les connaissances experts peuvent être prises en compte mais en dernier recours, mais l'approche reste très liée à la modélisation.

- **Modérément réalistes avec une incertitude quantifiée -** Proche de l'approche modérément réaliste, elle prend cependant en considération l'incertitude comme paramètre (souvent probabiliste) du modèle.
- **Scientifiquement procédural -** Ces modèles sont basés sur des données, à la fois issues du système modélisé mais également sur les données experts fournies par les acteurs du domaine. Ces modèles intègrent les faits et les valeurs non-épistémiques.
- **Modérément constructiviste** - L'analyse du risque est effectuée à partir de la construction mentale de l'évaluateur. Ces systèmes sont aussi bien liés à la modélisation qu'au jugement des experts.
- **Fortement constructiviste** - Le risque est considéré comme une construction sociale qui invoque des faits et leurs perceptions.

Ainsi l'analyse et l'évaluation des risques peuvent être regroupées en 3 approches distinctes :

Approche réaliste : le risque est considéré comme un attribut dans un système. Il est caractérisé à partir de fait objectif. Le risque peut ainsi être expliqué, prédit et contrôlé via une description scientifique des faits. Il est principalement caractérisé comme une information quantitative (sous forme de probabilité) et concerne des événements ou des conséquences. Cela passe par une analyse technique du phénomène étudié, représentant de manière précise ou approximative la réalité afin de produire au mieux une mesure du risque. L'objectif de cette approche est de mettre en place des critères de décision de risque permettant de mettre en place des stratégies pour la prévention des risques. Les méthodes employées sont généralement des méthodes quantitatives, à savoir des méthodes permettant de donner une valeur au risque considéré.

Approche constructiviste : le risque est considéré comme une construction sociale, correspondant à un attribut prenant place dans un système. L'analyse du risque est effectuée à partir de la construction de sens d'un groupe d'experts. Dans cette approche le risque peut être caractérisé par une information quantitative (probabilité, logique floue, etc.) mais la dimension physique du risque est une composante parmi la maitrise de l'événement, la peur, le caractère volontaire ou non de l'événement et d'autres facteurs psychologiques, sociaux et contextuels. Ces systèmes prennent en considération des facteurs non-épistémiques comme la morale, la politique, l'esthétique et d'autres facteurs difficilement quantifiables, mais peuvent mélanger données quantitatives et qualitatives. Ces systèmes ne produisent cependant que rarement des critères de décision mais plutôt des informations complémentaires pouvant être intégrées au processus de décision.

Approche procéduraliste : l'analyse du risque repose sur la compréhension mutuelle d'un risque considéré entre des scientifiques, des experts, des personnes concernées ou affectées par le risque et les décideurs politiques. L'approche est ainsi de trouver un consensus entre les différents parti-prenantes, et c'est cette concertation qui, une fois faite est utilisée comme indicateur pour l'évaluation des risques. C'est une approche autant sociale que technique.

Goerlandt et Montewka (2015) distinguent 12 catégories de méthodes de mesures ayant été utilisées pour l'évaluation des risques :

- **Probabilité de fréquence** : fraction de temps moyenne d'un événement après un test répété plusieurs fois.
- **Probabilité subjective** : degré de conviction d'un évaluateur fondé sur les éléments du modèle dont il dispose.
- **Probabilité modélisée** : mesure de probabilité calculée et basée sur les données du modèle. Cartographier les variables prédictives non probabilistes à une échelle de probabilité.
- **Indicateur quantitatif :** un rapport ou une mesure d'échelle d'intervalle d'une caractéristique du système, utilisée comme approximation de l'occurrence d'événements et / ou de conséquences. La mesure quantitative est dérivée de données.
- **Indicateur qualitatif :** catégorie ou ordonnancement d'une caractéristique du système, utilisée comme approximation de l'apparition d'événements et / ou de conséquences. La mesure qualitative est basée sur un jugement d'un assesseur, obtenu soit par jugement direct, soit dérivé d'un modèle mathématique.
- **Nombre flou :** une mesure dérivée du degré auquel une instance spécifique appartient à une certaine catégorie. Par exemple, le degré de similarité entre l'instance et la catégorie. Utilisé pour catégoriser les différents événements ou niveau de risque.
- **Événement :** un état spécifique du monde et comment cet état spécifié change et se développe sur un intervalle de temps.
- **Conséquence :** un type spécifique d'événements, relié à un autre événement par une relation causale, c'est-à-dire dans des conditions de conjonction constante, de succession temporelle et de mesure ou d'énoncé spatial.
- **Mesure qualitative de l'incertitude probante ou mesure quantitative de la force du savoir :** une mesure linguistique ou numérique sur une échelle ordinaire ou catégorielle

indiquant le manque de connaissance (ou la force de la connaissance) pour faire une mesure ou un état des lieux.

- **Mesure quantitative de l'incertitude probatoire :** mesure numérique d'un intervalle ou d'un rapport-échelle quantifiant l'incertitude épistémique liée aux paramètres d'un modèle, en appliquant une probabilité imprécise, une théorie des probabilités d'analyse liée à la probabilité ou une théorie de la possibilité.
- **Mesure de l'incertitude épistémique fondée sur des hypothèses :** une expression de l'incertitude épistémique, en particulier liée à la structure du modèle en pesant de multiples hypothèses plausibles liées à un phénomène donné.
- **Biais :** une mesure catégorique ou ordinale indiquant la direction de déviation par rapport à ce qui est considéré comme une réflexion précise du phénomène, par rapport à la représentation appliquée du phénomène accepté dans un contexte donné.

L'étude considérée (58 articles sur une période de 1970 à 2014) montre que l'intérêt pour le sujet a progressivement augmenté, avec 28 études réalisées entre 2011 et 2014 contre seulement 8 avant 2000. Certaines de ces mesures pouvant être utilisées conjointement dans la même étude. Par exemple, la notion d'événement est utilisée dans la totalité des études. La notion de conséquence se retrouve elle dans 47 des 58 études. La grande majorité des études utilisent la définition 1 d'Aven à savoir le risque comme valeur attendue, l'autre grand type de risque choisi étant la 6ème définition, à savoir le risque comme probabilité et scénario/ sévérité des conséquences. Ainsi la mise en place de scénarios est très utilisée dans les risques maritimes du fait de la grande hétérogénéité de ceux-ci. Ces scénarios étant utilisés pour évaluer des risques, conceptualisés comme des événements.

1.2.5 Systèmes existants pour l'évaluation de la vulnérabilité

Dans la majeure partie des systèmes d'évaluation, le risque est considéré comme la probabilité ou la possibilité qu'un événement soit non-désiré. L'évaluation est, elle, traditionnellement effectuée en 3 étapes (Fransas *et al.* 2012):

1. L'évaluation du risque en termes de ce qui peut advenir, de la probabilité que cela se produise et des conséquences possibles.
2. La gestion du risque terme de ce qui peut être fait, les options et les compromis disponibles entre le coût, les avantages et les risques.
3. L'impact des décisions et des politiques de gestion des risques sur les options et engagements futurs.

Afin d'évaluer ces risques, plusieurs systèmes sont utilisés pour prévenir ou améliorer la connaissance des risques pour la navigation maritime. Le système utilisé pour l'évaluation des risques maritimes est le système FSA (*Formal Safety Assessment*) normé et défini par l'IMO (International Maritime Organisation). Il s'agit d'une méthodologie structurée qui vise l'amélioration de la sécurité maritime pour la protection des vies, de la santé et de l'environnement maritime. Méthodologiquement, il s'agit d'une méthode d'évaluation basée sur le coût/bénéfice de chaque risque.

La méthode s'effectue en 5 étapes :

- **L'identification des risques** : cette étape permet d'identifier les risques en fonction de leur niveau à travers d'une liste établie par l'IMO.
- **L'analyse du risque** : il s'agit d'identifier les scénarios les plus importants en fonction de leurs occurrences et leurs conséquences. Cette étape permet d'identifier les zones les plus susceptibles de subir un risque.
- **Les options de contrôle des risques** : le but de cette étape est de mettre en place des options de contrôle, à savoir les méthodes opérationnelles et managériales pour la gestion des risques identifiés.
- **L'évaluation coût/bénéfice** : l'ensemble de ces solutions est comparé en fonction du coût de mise en œuvre de la solution et des conséquences économiques du risque considéré.
- **Les recommandations pour la prise de décision** : la dernière étape permet, au travers du système, de faire des recommandations pour les preneurs de décision : états, organisations internationales, compagnies maritimes, etc.

1.3 Vulnérabilité des réseaux de transport

Cependant, l'étude de la vulnérabilité est dans cette recherche ne s'intéresse pas à la vulnérabilité en mer, qui cherche à identifier et évaluer les risques individuels dans l'espace maritime mais se focalise sur la vulnérabilité du réseau maritime dans sa globalité. En effet, une grande partie des études sur les risques maritimes s'intéresse aux risques individuels et aux collisions. Dans cette recherche, il s'agit d'effectuer un travail sur la vulnérabilité dans le cadre d'un réseau de transport. Un accident individuel ne représente pas nécessairement un risque pour le réseau, ici défini comme la structure relationnelle des échanges. Cette partie s'intéresse à la vulnérabilité des réseaux de transport, et l'application des concepts existants dans le cadre

des réseaux maritimes, leurs définitions et leurs utilisations dans l'étude de la vulnérabilité des réseaux.

1.3.1 Risque et réseaux de transport

Avant de définir la vulnérabilité des réseaux, il est d'abord nécessaire de définir le risque pour un réseau, En effet, la vulnérabilité est ici appréhendée au travers d'un réseau. C'est donc la vulnérabilité du réseau et ses propriétés relationnelles qui sont ici au centre de cette recherche. Il convient ainsi non pas seulement de définir la « vulnérabilité » mais la « vulnérabilité d'un réseau ».

1.3.1.1 Vulnérabilité : définition dans le cadre d'un réseau

Comme défini lors de la précédente partie (Veyret et Reghezza 2005), la vulnérabilité peut avoir deux sens : un sens « impact » et un sens « social ». Dans le cas présent c'est la vulnérabilité dans le sens « impact » qui est retenue, à savoir le degré d'endommagement des enjeux, définie par la valeur des entités menacées. Ainsi, la première étape est ici de définir les enjeux relatifs aux réseaux de transports. En effet, la vulnérabilité des réseaux ne peut se définir sans au préalable comprendre les enjeux des entités exposées. Un réseau est une entité spécifique, et la notion de vulnérabilité s'inscrit dans ces particularités. Zavitsas (2011) définit la vulnérabilité des réseaux à la fois comme une probabilité, c'est-à-dire la potentialité d'une perturbation au sein d'un réseau, et comme un degré de dégradation, entrainant une baisse de performance une fois une perturbation réalisée. Ainsi la vulnérabilité d'un réseau se définit à partir d'un événement, une perturbation, qui va entrainer des modifications sur le réseau. Mesurer la vulnérabilité revient alors à mesurer l'efficacité d'un réseau à relier les lieux entre eux, dans l'espace et dans le temps, suite à un événement ayant une influence sur la structure de celui-ci. En effet, chaque composant d'un réseau (un tronçon de route, un port, une mer, une gare) participe au bon fonctionnement de l'ensemble du réseau (Gleyze, 2005).

Le terme de perturbation, inhérent aux études sur la vulnérabilité du réseau se doit d'être défini. Dans le cadre du réseau maritime, il s'agit d'un changement sur un réseau de transport, entrainant une modification positive ou négative sur un ou plusieurs composants du réseau, que ce soit les infrastructures (ports) les routes maritimes empruntées, la capacité des navires ou l'offre et la demande de transport. (Achurra-Gonzalez *et al.*. 2016). Ainsi le terme de perturbation sur un réseau revient à adapter le concept d'événement décrit précédemment.

1.3.1.2 Les enjeux du réseau : performance et efficacité

Comme décrit dans la partie précédente, la vulnérabilité est un degré de dégradation et d'endommagement d'un réseau correspondant à la valeur des entités menacées. Il convient alors de s'interroger sur la nature de ces entités, et comment la valeur de celle-ci peut en être dégradée afin de déterminer les enjeux des réseaux de transport. La notion d'enjeu avait été définie précédemment comme une « *personne, bien, patrimoine, activités susceptibles d'être affectées par la réalisation du phénomène redouté.* »

Gleyze (2005) définit un réseau de transport comme un médiateur spatial, à savoir une entité ayant pour capacité et pour fonction de relier les lieux entre eux. Ce médiateur spatial offre des potentialités relationnelles afin de permettre des déplacements dans l'espace. Ainsi, l'enjeu d'un réseau de transport est de maintenir et maximiser ces capacités relationnelles. Deux notions sont utilisées pour décrire les capacités et possibilités relationnelles offertes par les réseaux : la performance et l'efficacité. Ces deux notions sont proches mais permettent de décrire l'enjeu des réseaux de transports et ainsi définir et quantifier la valeur d'un réseau de transport en tant que médiateur spatial.

La performance, quant à elle est relative à un objet est définie comme le « *Rendement, fiabilité très élevé ou exceptionnel d'une machine, d'un objet, d'un matériau.* » (CNTRL, 2017). Adapté à la notion de réseau, elle fait référence au rendement de celui-ci et donc, la capacité de la structure relationnelle à maintenir des capacités relationnelles. La performance est donc relative aux propriétés intrinsèques du réseau. Ces propriétés sont, dans cette recherche, les propriétés spatiales et temporelles du médiateur spatial. La seconde notion essentielle est l'efficacité. L'efficacité se définit comme le « *Caractère d'une personne, d'un organisme efficace, qui produit le maximum de résultats avec le minimum d'efforts, de moyen* » (Larousse). Ici l'accent n'est pas mis sur les propriétés de l'objet considéré mais sur les résultats, et donc sur la capacité du réseau à fournir des potentialités relationnelles pour ses utilisateurs. Ce n'est donc pas la structure mais l'usage de la structure qui en est l'enjeu.

Performance et efficacité, sont associées à une valeur, déduites des propriétés du réseau et son utilisation. Cette valeur peut être exprimée à travers l'espace, le temps ou peut être associée à un coût. En effet, moins le réseau sera performant plus il sera coûteux, en termes de coût de transport individuel comme de fonctionnement.

Plus spécifiquement, l'enjeu d'un réseau maritime est double. En effet, l'espace maritime est un espace de transaction mais il n'est pas l'origine et la destination du transport, qui se fait d'un

lieu terrestre à un autre. Ainsi franchir cette interface maritime demande de transiter par un port. Il convient alors de distinguer l'enjeu lié à l'efficacité et la performance des ports pour maintenir la structure des échanges terre/mer et l'efficacité et la performance de l'espace maritime, à être un espace de transition efficace et performant pour les échanges. A cela peut être distingué un 3ème enjeu lié aux deux premiers : la relation existante entre la performance de l'espace maritime comme médiateur spatial et la performance des ports en tant qu'interface des échanges. En effet, une perturbation dans l'espace maritime, ayant un impact sur la performance du transport maritime peut indirectement impacter les ports dans leurs rôles d'organisation du trafic et donc du réseau maritime.

1.3.2 Evaluation de la performance d'un réseau : concepts clés

Ces notions de performance et d'efficacité sont présentes dans plusieurs concepts qui permettent d'appréhender la performance et l'efficacité des réseaux. Ces trois concepts sont la vulnérabilité, la robustesse et la fiabilité. La vulnérabilité, définit dans les parties précédentes comme une probabilité, c'est-à-dire la potentialité d'une perturbation au sein d'un réseau et comme un degré de dégradation, entrainant une baisse de performance une fois une perturbation réalisée, a déjà été abordée. Néanmoins d'autres concepts clés permettent de mettre en évidence l'enjeu que représentent la performance et l'efficacité des réseaux.

1.3.2.1 La robustesse

La robustesse fait référence à la capacité du réseau à fonctionner malgré un dysfonctionnement sur un composant suite à une perturbation, (Snelder 2010). La robustesse statique fait référence à la capacité de maintenir la connexité après une suppression aléatoire d'une partie du réseau, la robustesse dynamique s'intéresse à la redistribution des flux suite à une perturbation.

1.3.2.2 La fiabilité

La fiabilité est une définition, orientée-utilisateur et non systémique. La définition la plus communément admise est celle de Wakabayshi et Iida (1992) qui est la probabilité que le système fonctionne correctement pour une période où l'utilisateur cherche à utiliser le système.

Ces trois mesures ont ainsi une approche différente. La vulnérabilité et la robustesse sont assez similaires et font appel au concept de perturbation pour tester, dans le cas de la vulnérabilité, le degré de dégradation, et dans le cas de la robustesse, la capacité à maintenir un fonctionnement. La fiabilité, elle n'est pas forcément liée au concept de perturbation, et ne prend pas en compte les propriétés intrinsèques du réseau, uniquement son utilisation. La fiabilité est donc

principalement liée à la notion d'efficacité. Enfin, robustesse et vulnérabilité sont en partie analogues même si la définition de vulnérabilité est plus large. La notion de robustesse, telle que définie par Snelder (2010) s'intéresse au degré de dégradation d'un réseau sans se soucier de la probabilité qu'apparaisse un événement perturbateur, contraire à la notion de vulnérabilité.

1.3.3 La vulnérabilité et fonction de la structure

Gleyze (2005) définit trois aspects de la vulnérabilité des réseaux : l'aspect matériel, l'aspect structurel et l'aspect fonctionnel. L'aspect matériel fait référence aux potentialités d'endommagement des infrastructures du réseau (ex : routes, voies ferrées, gares, ports), l'aspect structurel décrit le réseau par ses potentialités relationnelles (sa capacité à relier les lieux entre eux), et enfin, l'aspect fonctionnel s'intéresse aux services offerts par le réseau. Ces trois vulnérabilités sont liées entre elles. Par exemple, si une route est vulnérable à une inondation (aspect matériel), cela affectera directement les potentialités relationnelles du réseau (aspect structurel), et donc l'usage du réseau (aspect fonctionnel).

Dans cette optique, le réseau est décrit comme un médiateur, un objet relationnel mettant en relation les différentes parties du graphe. C'est à travers ce rôle qu'est ici envisagé la vulnérabilité, et les propriétés spatiales intrinsèques du réseau (topologiques, vectorielles, géométriques) permettent d'évaluer ce rôle de médiateur. De cette manière, Gleyze (2005) évalue ainsi la menace pesant sur la capacité du réseau à relier les lieux entre eux. Cela permet également d'expliquer les dommages indirects liés à l'usage, voire à optimiser cet usage via la compréhension de la structure de l'espace.

1.3.3.1 La vulnérabilité connective et d'accès

Pour évaluer la vulnérabilité d'un réseau, les deux notions principales pour la mesure de la vulnérabilité d'un réseau sont l'accessibilité et la connexité. Taylor, Sekhar, et D'Este (2006) distinguent la vulnérabilité connective et la vulnérabilité d'accès. La vulnérabilité connective porte sur les liens du réseau. Elle est liée à l'allongement des plus courts chemins, un lien entre deux nœuds est dit vulnérable si sa dégradation suite à une perturbation augmente le coût du voyage entre deux nœuds. La vulnérabilité d'accès est relative aux nœuds du réseau, un nœud est dit vulnérable si suite à une perturbation son accessibilité diminue fortement.

1.3.3.2 Aléas et perturbations

La vulnérabilité du réseau se caractérise par sa propension à subir des perturbations, comme événement survenant sur le réseau. Ces évènements modifiant la structure relationnelle des

réseaux de transports. Gleyze (2002) définit une perturbation comme un événement aléatoire survenant sur un réseau. Celles-ci perturbent le fonctionnement et l'évolution du réseau. Elles peuvent être causées par la nature elle-même, et donc être exogènes à la structure du réseau, ou liées à un dysfonctionnement du réseau, et donc être endogènes. Ces perturbations peuvent être quantifiées de trois manières (Scemama *et al.*, 1998) : par le temps, c'est-à-dire la durée totale de la perturbation, par l'espace, que ce soit la position sur le réseau ou l'extension spatiale de la perturbation et enfin par la forme spatiale de la perturbation. Selon Blancher (1998) les perturbations affectent le réseau de trois manières différentes. La première est la localisation, c'est-à-dire le positionnement relatif ou absolu à l'intérieur du réseau. Plus celui-ci sera central (spatialement ou typologiquement) plus celui-ci est lui-même vulnérable du fait de son poids important pour l'ensemble du réseau. Le second facteur est la densité du réseau, la concentration des potentialités relationnelles du réseau fait qu'une zone du réseau peut être très vulnérable (ex : une portion importante des routes proches d'un lit fluvial). Enfin, l'interdépendance du réseau avec d'autres réseaux (vulnérabilité ou agressivité) peut créer des amplifications ou des diffusions des perturbations.

Ashurra-Gonzales (2015) définit une perturbation sur un réseau de transport comme le moindre changement, positif ou négatif sur un ou plusieurs composants du réseau, que ce soit les infrastructures (ports) les routes maritimes empruntées, la capacité des navires ou l'offre et la demande de transport. Nicholsson *et al.* (2003) classent ces perturbations selon deux axes principaux : la prédictibilité (prédictible – non-prédictible) et la régularité (régulier – non-régulier)

Ainsi, une perturbation se définit comme l'élément ayant une influence sur le mauvais fonctionnement du réseau, son efficacité. L'efficacité d'un réseau peut se définir comme la capacité à organiser le trafic afin d'assurer le meilleur fonctionnement en termes de temps et de coût. Berdica et Mattsson (2007) définissent une perturbation comme la susceptibilité qu'un système connaisse un accident qui provoque des fermetures ou une dégradation de route.

D'un point de vue d'un réseau, une perturbation est définie comme l'impact d'une cause externe ou interne provocant un dysfonctionnement de ce réseau (Rocher, 1987). Les causes externes regroupent l'ensemble des aléas naturels (cyclones, tsunamis, vagues scélérates, etc.) et anthropiques (marées noires, pirateries, objets flottants non identifiés, collision avec une plate-forme, etc.) et les causes internes (collisions entre navires, feu/explosion, etc.).

La dernière figure (Fig.6) permet de résumer l'ensemble des définitions et concepts expliqués dans cette partie et de comprendre les liens existants entre chaque. Cette recherche ainsi, cherche à évaluer la vulnérabilité du réseau maritime à travers l'accessibilité de celui-ci que ce soit l'accessibilité en mer, ou l'accessibilité aux ports.

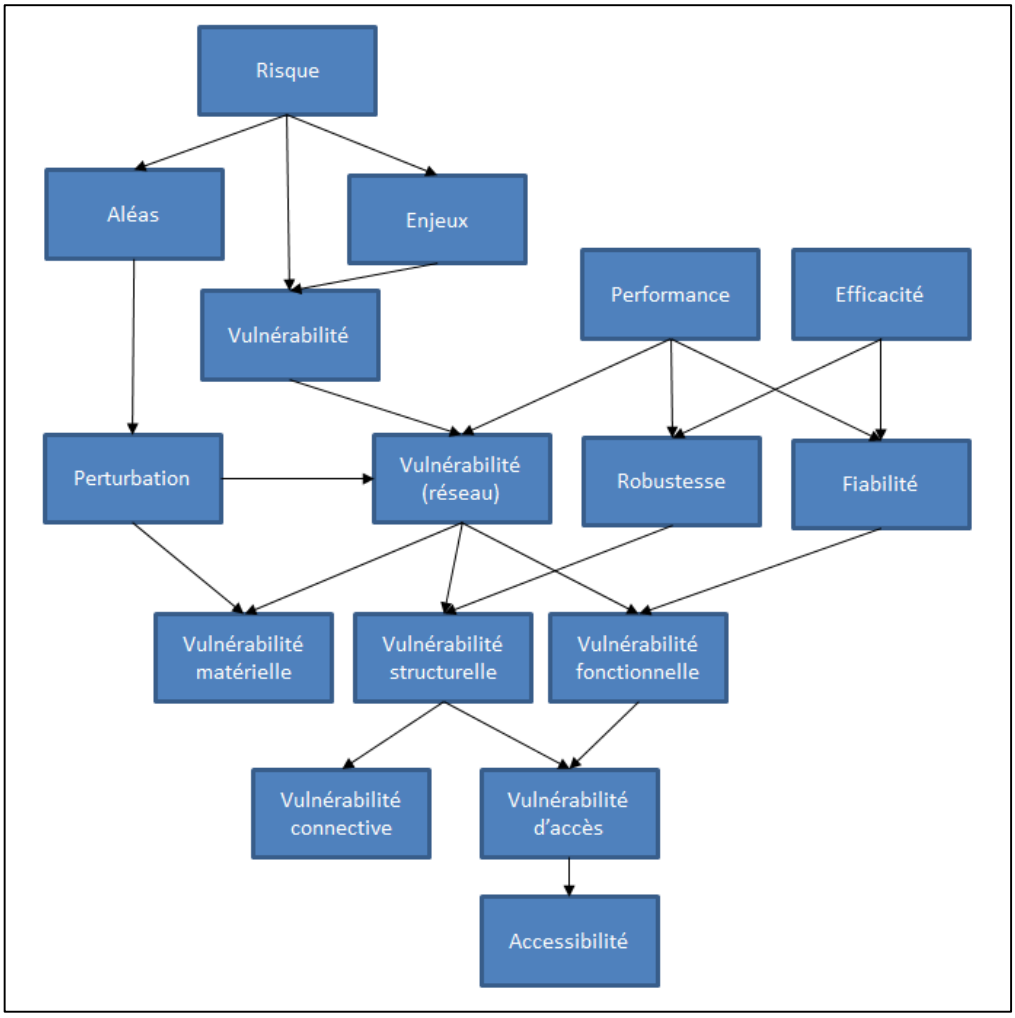


Figure 6. Relations entre les différents concepts relatifs au risque des réseaux

1.3.4 De la vulnérabilité à l'accessibilité

Cette partie s'intéresse au lien entre la vulnérabilité des réseaux (l'affectation de leur performance suite à un événement) et la notion d'accessibilité (capacité à atteindre un lieu).

En effet, un grand nombre de modèles d'optimisation des réseaux se basent sur la recherche d'une distance minimum, et donc du critère de coût de transport minimum. Plusieurs méthodes sont utilisées pour quantifier la vulnérabilité des réseaux (Zavitsas 2012) : la variabilité, l'accessibilité et la fiabilité rencontrée. La variabilité et la fiabilité rencontrées sont toutes deux des mesures pour la fiabilité du réseau et ces types de mesures sont utiles dans le cadre d'une mesure de la vulnérabilité fonctionnelle d'un réseau. Ainsi pour mesurer la vulnérabilité d'un

réseau de transport à travers l'accessibilité, il existe selon Gleyze (2005) trois étapes nécessaires pour étudier la vulnérabilité des réseaux de transports :

1. Identifier les menaces : avoir la connaissance des aléas susceptibles d'endommager les réseaux de transport

Ces aléas ont été décrits lors dans la partie 1.2, il s'agit de l'ensemble des éléments pouvant affecter la performance du réseau. Ces éléments sont statistiques ou dynamiques, surviennent et évoluent dans le même espace que celui du réseau maritime.

2. Connaitre les enjeux : identifier les éléments vulnérables dans le réseau de transport

L'enjeu est de préserver la performance du réseau et des potentialités relationnelles. Dans le cadre du réseau maritime, c'est donc de préserver l'efficacité des routes maritimes, et donc les trajectoires les plus courtes, moins chères ou les plus sûres, en fonction de l'objectif visé par les utilisateurs du réseau.

3. Déterminer en quoi les enjeux sont menacés, et comment les dommages sont répartis

L'efficacité du réseau maritime doit également être mise en relation avec l'efficacité des ports à jouer un rôle d'organisateur du réseau, et la vulnérabilité d'une route maritime doit être mise en relation avec les conséquences négatives que cela peut avoir sur les ports, notamment sur l'ETA (le temps d'arrivée estimé).

En cela, la question de l'accessibilité en mer et de l'accessibilité au port est fondamentale dans cette recherche, l'accessibilité étant la composante géographique de la vulnérabilité des réseaux. Ainsi la première étape est la modélisation d'objets spatio-temporels, correspondant aux aléas et à leurs dynamiques. En effet, les menaces sont des aléas, qui contextualisés dans un réseau, sont des perturbations, événement entrainant une modification. La seconde étape est la modélisation du réseau maritime et de ses composantes (navires, ports), enfin la dernière étape est la simulation des aléas sur les comportements maritimes afin d'effectuer une évaluation des risques maritimes.

1.4. Accessibilité et barrières

La notion d'accessibilité est une notion fondamentale en géographie des transports, et plus largement en géographie. En effet, maintenir celle-ci est l'enjeu principal des réseaux de transports. Il y a donc deux éléments à prendre en considération dans la vulnérabilité : les

perturbations et les caractéristiques du réseau. Ces deux éléments ont une influence sur l'accessibilité dans le réseau.

1.4.1 Concept d'accessibilité

Cette accessibilité est liée à la localisation et la distance. Ainsi la notion d'accessibilité peut être définie de la manière suivante :

- La facilité d'atteindre dans un réseau la destination désirée (Niemeier, 1997)
- La capacité d'un lieu à être rejoint, ou de rejoindre d'autres lieux. (Rodrigue *et al.*, 2013)

En effet, ces perturbations sur le réseau sont également le fait des caractéristiques topologiques et géométriques propres du réseau. Deux notions, basées sur ces caractéristiques, sont fondamentales pour appréhender la vulnérabilité des réseaux : l'accessibilité et la centralité. « *L'accessibilité se réfère en général à une ou plusieurs localisations et mesure la facilité d'un lieu à être rejoint par un acteur, une clientèle, une information ou un service* » Selon Martinelli *et al.* (2000), la notion d'accessibilité exprime ainsi l'offre de possibilités de déplacements donnée par un système quelconque. L'accessibilité peut être « relative » et faire référence au degré de séparation spatiale entre deux lieux, ou « intégrale », et faire référence à la séparation entre un lieu et l'ensemble des autres localisations (Gleyze, 2002).

La notion de centralité est liée à la notion d'accessibilité du fait que les nœuds centraux (relatif à leur position à l'intérieur de la structure du réseau) sont les plus accessibles. Freeman (1978) distingue trois propriétés permettant de définir le degré de centralité d'un nœud : la propriété de degré, qui est fonction du degré de distribution du point, la propriété de proximité, qui équivaut à la distance cumulée des autres nœuds du réseau minimal et enfin la propriété d'intermédiaire, c'est à dire, le fait de se retrouver sur les routes les plus empruntées. Ces notions sont utilisées dans les différents concepts permettant d'évaluer la vulnérabilité.

1.4.2 Typologie des accessibilités

L'accessibilité est une notion permettant de définir la performance des réseaux, à savoir que plus l'accessibilité est importante, plus le réseau peut être qualifié de performant. Cette accessibilité peut cependant être décrite de manière globale, liée à la structure, ou de manière locale, pour chaque composant du réseau. L'Hostis et Conesa (2010) définissent 3 composantes essentielles cette accessibilité :

1. Position relative dans l'espace de référence : les lieux centraux sont les plus accessibles. C'est la composante locale de l'accessibilité.

2. La forme ou la structure du réseau : possibilités de déplacements offertes par la structure. C'est la composante globale de l'accessibilité.
3. La performance ou utilisabilité : performance en termes de vitesse du système de transport.

Ces composantes clés permettent d'appréhender l'accessibilité. Cependant, les mesures d'accessibilité peuvent être basées sur plusieurs paramètres en fonction du type de modèle (Geurs et van Wee 2004). Ces types d'accessibilité sont associés aux types de vulnérabilité et de réseaux précédemment abordés :

Type d'accessibilité	**Description**	**Type de vulnérabilité associée**	**Type de réseau associé**
Basé sur infrastructure	Analyse de la performance ou d'un niveau de service des infrastructures de transports à partir d'indicateurs	Performance des infrastructures du réseau (Vulnérabilité matérielle)	Réseau strictement défini
Basé sur la localisation dans l'espace	Analyse de l'accessibilité des infrastructures à un niveau macro-géographique. Ces mesures cherchent à décrire le niveau d'accessibilité à la distribution des activités dans un espace donné.	Possibilités spatiales offertes par la structure (Vulnérabilité structurelle)	Réseau strictement défini
Basé sur les personnes	Analyse de l'accessibilité à un niveau individuel via les possibilités offertes aux individus pour se déplacer.	Capacité d'usage de la structure pour un usager (Vulnérabilité fonctionnelle)	Réseau vaguement défini
Basé sur l'utilité économique	Analyse des bénéfices liés aux niveaux d'accès des activités spatialisées pour une population donnée.		

Contrairement aux réseaux routiers ou ferroviaires, le réseau maritime n'est pas contraint par ses infrastructures (route, rail) pour ces parcours. Sa structure est donc déterminée par les parcours individuels des navires. En cela une mesure basée sur les personnes est nécessaire pour la mesure de la vulnérabilité du réseau maritime. Cette accessibilité peut être prise en compte différemment en fonction de la structure du médiateur spatial (Rodrigue *et al.*, 2013). La première, dite accessibilité topologique est propre à un réseau :

Accessibilité topologique : accessibilité propre à un réseau, modélisé sous forme de graphe. Se mesure à partir des possibilités spatiales offertes par celui-ci.

La seconde dîtes contiguë, s'applique à des surfaces :

Accessibilité contiguë : accessibilité propre à une surface, à savoir que l'accessibilité est un attribut mesurable de chaque endroit, car l'espace est considéré comme une manière continue. Cet espace peut être un continuum ou discrétiser en des zones délimitées.

L'espace maritime étant une surface, il est alors nécessaire d'avoir un niveau d'accessibilité en chaque lieu. Dans la mesure où l'accessibilité est un attribut de chaque lieu dans une surface, il faut définir ce niveau par rapport aux élements présents dans cet espace.

1.4.3 Barrières et perturbations

Les éléments présents dans cet espace peuvent être conceptualisés par la notion de barrière. Le mot barrière est défini dans le Larousse comme un « *Obstacle naturel qui interdit le passage ou le rend difficile* » mais également « *Ce qui constitue un obstacle entre deux personnes, deux groupes* ». Les barrières sont vues ici dans un contexte d'échange. Les barrières sont donc liées aux éléments présents dans l'espace ou dans les activités humaines dans cet espace ou affectant cet espace à distance (ex : cours du Pétrole, décisions géopolitiques). L'ensemble de ces barrières ne constitue pas une perturbation, en effet les perturbations se définissent comme un processus spatio-temporel de l'évolution de la barrière dans le temps. Ces barrières peuvent être classées en fonction de leurs dynamiques respectives.

Si les barrières peuvent être conceptualisées comme des objets obstruant (matériel ou non), les perturbations correspondent à leurs dynamiques, qu'elle soit prévisibles ou non. En effet, la perturbation n'est pas la barrière en tant que telle mais la dynamique des barrières (apparition, disparition, modification). En effet, sans dynamique, la barrière peut être anticipée en amont du voyage et ne peut être considérée comme perturbation.

Il est ainsi possible de classifier les barrières en fonction de leurs évolutions :

1. Barrières permanentes : ces éléments peuvent être accentogènes, et créer des risques. Ils ne sont pas en revanche pas dans la catégorie des perturbations, du fait qu'une perturbation est définie comme un processus (Fig. 7). Cependant, ces barrières peuvent également connaitre des apparitions/disparitions/modifications brutales, et ces modifications peuvent être source de perturbations (ex : fermeture d'un canal, apparition d'une nouvelle zone réglementaire).

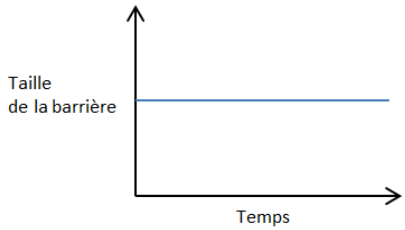


Figure 7. Barrière permanente

2. Barrières cycliques : ces barrières admettent un début de leurs processus (apparition, modification) qui est plus ou moins prévisible (ex : phénomène El Nino). Cependant, leurs natures et causes peut être déterminées, ces barrières sont donc plus ou moins prévisibles (ex : tempêtes tropicales) du fait de leur caractère cyclique (Fig.8) : les causes de leur apparition sont connues. Ce type de barrières s'applique principalement aux phénomènes naturels.

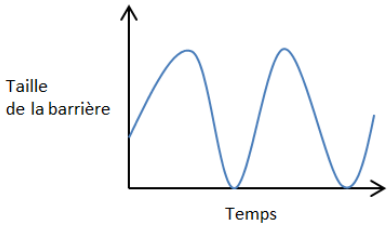


Figure 8. Barrière cyclique

3. Barrières temporaires : le processus de ces barrières apparait et disparait après un temps donné (Fig. 9). Ces barrières sont non prédictibles et non régulières, elles peuvent représenter le type de barrière le plus imprévisible, et donc la catégorie pouvant être qualifiée de plus vulnérable.

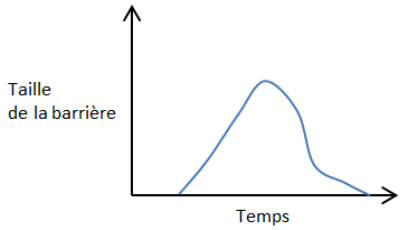


Figure 9. Barrière temporaire

1.4.3.1 Barrières et fonctions

Les barrières existent sous plusieurs formes ayant des fonctions différentes. Dans le domaine du risque, les barrières sont étudiées pour leurs fonctions préventives et protectrices. Hollnagel (1999) classifie les barrières en quatre catégories : les barrières matérielles, les barrières fonctionnelles, les barrières symboliques et les barrières immatérielles. Les barrières matérielles empêchent physiquement l'accident de survenir (ex : ports, murs, frontières). Les barrières fonctionnelles correspondent aux éléments mis en place spécifiquement pour le fonctionnement d'un système (ex : le cran de sureté d'un révolver.). Les barrières symboliques correspondent aux éléments qui vont restreindre l'accès via l'interprétation d'un usager (ex : un panneau de limitation de vitesse, un sens interdit), cela peut être une interdiction formelle ou une recommandation. Enfin, les barrières immatérielles sont l'ensemble des éléments de réglementation (lois, règles de conduites). Contrairement à la catégorie précédente elles ne sont pas forcément affichées mais connues de l'usager. Enfin, Hollnagel distingue des barrières dans le cadre de barrières de protections à un objet, activité ou lieu précis. Cependant la notion de barrière est versatile, et celle-ci peut également constituer des éléments obstruant pour une activité de transport.

1.4.3.2 Barrières et espace : absolues, relatives ou arbitraires

Rodrigue(2013) classifie les barrières pour le transport en fonction de leur degré de contrainte sur le transport, il distingue ainsi les barrières absolues, relatives et arbitraires. Les barrières absolues ont pour effet d'empêcher tout mouvement au sein du réseau. Dans un réseau maritime, cela correspond à l'interface terre/mer, soit à la limite de l'espace maritime. En effet, l'interface terre/mer est une discontinuité, et donc se caractérise comme une limite infranchissable.

Les barrières relatives réduisent et restreignent le degré de liberté de l'espace, et donc réduisent la connectivité du réseau. Elles influent ainsi sur les routes empruntées pour relier deux endroits du réseau. Elles correspondent aux caps, détroits, canaux, icebergs, et tout élément influant sur

la liberté d'usage de l'espace maritime. Les mauvaises conditions climatiques peuvent être ici définies comme des barrières relatives dynamiques. Enfin les barrières arbitraires, sont des barrières ne présentant pas d'effets physiques sur le mouvement, mais liées à des facteurs immatériels (juridictions, droits de passages, zone de piraterie, etc.). Ces barrières sont liées à des décisions politiques, juridiques et de l'ensemble des contraintes liées à l'activité humaine.

1.4.4 Barrières et réseaux

La typologie de (Nijkamp, Rietveld, et Salomon 1990) s'intéresse à la nature des barrières en fonction de ces causes. Elle a cependant été faite dans le cadre des réseaux de communication. Cependant un nombre important d'éléments peuvent être transposés ou adaptés à la nature des réseaux de transports, notamment des réseaux maritimes.

1.4.4.1 Barrières physiques

Les barrières naturelles correspondent à des barrières liées à la nature. Celles-ci correspondent à tous les éléments physiques non-anthropiques. Dans l'espace maritime, celles-ci sont récifs, icebergs, traits de côtes, vagues, et l'ensemble des éléments ayant une influence, positive ou négative sur la navigation des navires.

1.4.4.2 Barrières de congestion

Ces barrières sont liées à la saturation d'une infrastructure du réseau, cela peut être la congestion d'une ligne téléphonique ou d'une route dans un réseau. Dans le cadre du transport maritime, cela peut s'appliquer aux passages étroits (détroits, canaux) ainsi qu'aux zones d'entrées des ports (Rodrigue 2004). Cependant, en haute mer, il n'est pas possible de parler d'effet de congestion du fait de la faible densité de navire en comparaison à l'espace disponible. Ces barrières peuvent créer un nombre important de risques comme les collisions.

1.4.4.3 Barrières fiscales

Les barrières fiscales correspondent aux coûts des visas dans le cadre des communications internationales. Dans le cadre du réseau de transport maritime cela peut correspondre aux coûts des ports et raffineries, ainsi que les coûts de certains passages stratégiques comme le canal de Suez, ou celui de Panama.

1.4.4.4 Barrières institutionnelles

Les barrières institutionnelles correspondent aux coûts pour traverser les frontières des différentes juridictions, ainsi qu'aux interdictions, totales et relatives, d'entrer dans certaines zones ou certaines eaux territoriales pour des questions diplomatiques ou géostratégiques.

1.4.4.5 Barrières techniques

Les barrières techniques correspondent aux barrières dont les infrastructures ne sont pas adaptées pour le transport. Dans le cadre du réseau maritime cela peut correspondre par exemple, à la capacité d'accueil des ports, des contraintes de passages des canaux (Panamax, Suezmax).

1.4.4.6 Barrières culturelles, de langage et d'information

La dernière catégorie regroupe les barrières liées aux cultures, langues et les barrières d'information. Dans le cadre du transport maritime, secteur mondialisé, le concept de barrières culturelles, ou de langage n'est pas réellement pertinent. Cependant les barrières d'information, par exemple la non-connaissance des marchés, peuvent faire varier les trajectoires, voire le choix de la destination.

Conclusion du chapitre 1

Le risque est un objet scientifique pluridisciplinaire : il peut être traité en fonction de la discipline, par des démarches soit quantitatives soit qualitatives. En géographie, le risque est principalement décrit et étudié sous la forme « Risque = Aléas * Vulnérabilité ». Cette vulnérabilité connait deux approches : une qualitative « vulnérabilité sociale » l'autre quantitative « vulnérabilité d'impact ». C'est cette seconde approche qui est considérée.

Le risque dans le cadre des réseaux de transport est appréhendé et évalué via la notion de perturbation. Ces perturbations sont des événements ayant une influence sur l'organisation du réseau en tant qu'objet étude. Ces perturbations affectent la connectivité du réseau, et donc son efficacité comme médiateur spatial, à savoir une structure permettant de relier les lieux entre eux.

Le réseau maritime s'étend sur un espace ouvert, et sa structure ne dépend pas une d'une infrastructure (un ensemble de route, de rail) mais d'une surface. Cette surface connait des éléments (anthropiques, naturels) qui peuvent former une perturbation dans l'espace maritime. Ces perturbations peuvent être géographiques (marées noires, iceberg, piraterie maritime) et se matérialiser dans l'espace maritime ou économique (pénuries, fermeture de ports) et modifier la structure de l'espace et des échanges.

Les perturbations spatiales influent sur l'efficacité du réseau maritime de par leur influence sur l'accessibilité des navires à l'espace. Ils forment ainsi des barrières, statiques ou dynamiques, matérielles ou immatérielles (zone interdite à la navigation). Ces barrières et leurs influences

sur le réseau de transport, constitue la vulnérabilité à la fois fonctionnelle (l'usage du réseau à des fins de transport) et structurelle (capacité à maintenir une structure spatiale pour le transport).

Chapitre 2 : Modélisation et simulation des réseaux de transport et de l'environnement maritime

Le second chapitre de la thèse présente la modélisation du réseau et de l'espace maritime. En effet, la modélisation spatiale du réseau et de l'espace maritime est nécessaire pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime. Ainsi, cette partie s'intéresse à la théorie des graphes, méthode omniprésente dans la modélisation de tout type de réseau (Lugo et Ducruet, 2012). Elle décrit les principes, les propriétés et caractéristiques des graphes et leurs utilisations pour la modélisation des réseaux.

2.1. Formalisation des réseaux

La première partie s'intéresse à la modélisation des réseaux de transport comme objet géographique. Il existe plusieurs méthodes pour la modélisation des réseaux comme objet géographique, que ce soit des réseaux strictement définis, vaguement définis.

Le choix d'une modélisation est crucial, notamment pour le choix des indices et indicateurs qui en découlent pour la mesure de la structure et donc de la vulnérabilité du réseau. Beguin et Thomas (1997) distinguent 4 méthodes pour la modélisation des réseaux, et peu de nouvelles approches ont émergés quant aux techniques de modélisation des réseaux (Rodrigue, 2013). Parmi celles-ci, peuvent être recensées : la théorie des graphes, les matrices de plus courts chemins, la géomorphométrie et enfin les valeurs propres des matrices d'adjacences. Cependant, les matrices de plus courts chemins et les matrices d'adjacences ne peuvent être déduites uniquement à partir d'un graphe, ce qui fait que ces 3 méthodes peuvent être regroupées en une seule : la théorie des graphes. La géomorphométrie, elle, correspond à l'analyse topologique des réseaux hydrographiques et suppose, un arbre directionnel, à savoir que les directions prises par le réseau sont à sens unique : cette méthode ne peut ainsi pas s'appliquer aux réseaux de transport qui suppose qu'à partir d'un lieu il est tout à fait possible d'atteindre tout autre lieu à travers du médiateur spatial.

Dans une grande partie des études portant sur le réseau maritime, la question du choix d'une méthode pour la modélisation des réseaux n'est même pas investie, la théorie des graphes est utilisée sans justification.

2.1.1 Modélisation des réseaux via théorie des graphes

Cette partie s'intéresse à la théorie de graphes pour la modélisation du réseau maritime. C'est en effet l'unique méthode utilisée à ce jour pour la modélisation des réseaux. Les graphes

permettent de décrire l'ensemble des propriétés spatiales des réseaux et donc le traitement des informations spatio-temporelles décrivant une activité de transport dans un médiateur spatial. Dans un premier temps, la formalisation mathématique et les propriétés associées au graphe seront exposées.

2.1.1.1 Définition des graphes

Cette partie décrit la formalisation des graphes, leurs propriétés et leurs utilisations pour la modélisation des réseaux. Premièrement, il convient de définir le graphe en tant qu'objet mathématique.

2.1.1.2 Formalisation mathématique

La définition du mathématicien Claude Berge est la plus communément admise pour décrire un graphe : « *Un graphe est un schéma constitué par un ensemble de points et par un ensemble de flèches reliant chacune d'elles. Les points sont appelés les sommets du graphe, et les flèches les arcs du graphe* ». Ils se définissent, au sens mathématique, par un ensemble de sommets (ou nœuds, selon les auteurs) et d'arêtes (ou liens) tel que : G = (N,L). Les nœuds sont les points terminaux et d'intersection des graphes, les liens des éléments reliant les différents nœuds entre eux (Fig.10). Un graphe peut uniquement être défini par ses propriétés topologiques, mais peut aussi avoir des propriétés géométriques et vectorielles associées.

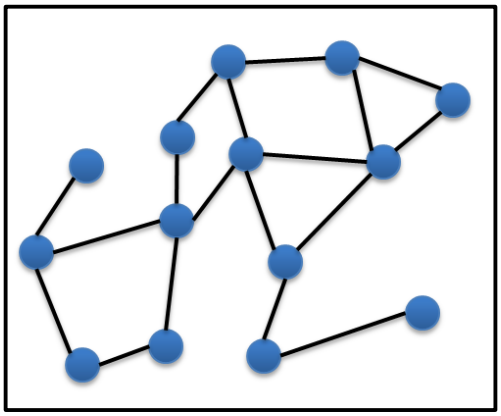


Figure 10. Exemple de graphe constitué de nœuds et de liens

2.1.2 Propriétés spatiales des graphes

2.1.2.1 Propriétés topologiques

Le principal atout de la théorie des graphes est dans la description de la topologie des réseaux qu'elle formalise (Fig. 11). Cela permet d'étudier la connexité et la connectivité de ceux-ci qui sont des notions essentielles à l'étude des réseaux.

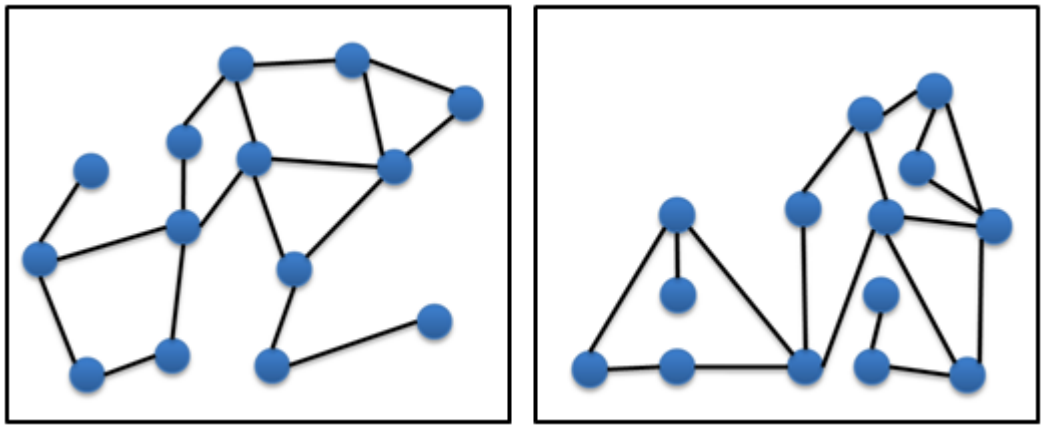


Figure 11. Graphe aux propriétés topologiques identiques

La connexité

La connexité est une propriété topologique du graphe qui se réalise lorsque les composants du graphe sont connectés entre eux. En cela, il correspond au degré de fragmentation du graphe. Si le graphe est non connexe, il se décompose alors en composantes connexes (Muller 2002).

La connectivité

Elle se définit comme le degré de connexité du graphe, c'est-à-dire la densité de mise en relation entre les lieux. En cela, la connectivité, désigne une quantification de la connexité. Un graphe vide est un graphe d'une connectivité minimale, c'est-à-dire qu'aucun des nœuds du graphe est relié à un autre nœud. Un graphe complet est un graphe d'une connectivité maximale, où tous les nœuds sont reliés entre eux.

Le degré de distribution (k)

Il permet de définir la connexité et la connectivité du graphe. Si k=1 pour l'ensemble des éléments du graphe (dans le cas d'un chemin simple) alors le graphe est connexe. Plus le degré de distribution k d'un composant est élevé plus ce composant est connecté au graphe. Par exemple, dans un graphe complet, k équivaut au nombre de nœuds du graphe – 1 (le nœud évalué).

Ces propriétés permettent ainsi de décrire la topologie du graphe, les propriétés seront utilisées plus tard pour évaluer la vulnérabilité des graphes. La forme topologique du graphe permet ainsi de définir plusieurs catégories de graphes en fonction de leurs propriétés topologiques :

- **Graphe vide :** graphe ne contenant aucun nœud, ni aucun lien.
- **Graphe complet :** graphe où tous les nœuds sont reliés entre eux par un lien. Le graphe exemple est qualifié de graphe complet (Fig. 12)

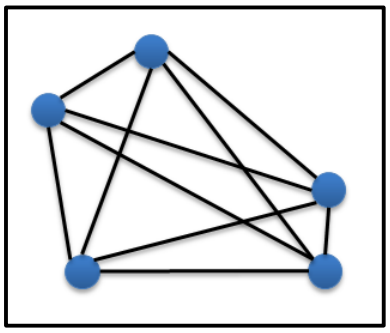


Figure 12. Exemple de graphe complet

- **Arbre :** graphe connexe et d'un seul tenant qui ne contient aucun parcours cyclique (Fig. 13).

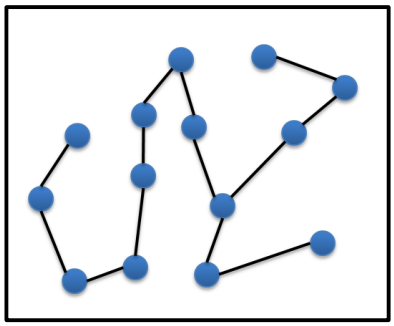


Figure 13. Exemple de graphe en "arbre"

- **Graphe planaire/Graphe non-planaire :** graphe qui ne permet pas l'entrecroisement des liens (Fig. 14).

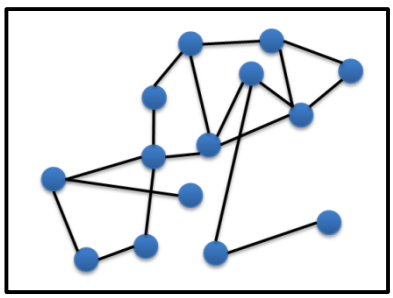


Figure 14. Exemple de graphe non-planaire

- **Graphe pondéré :** graphe dont les composants (nœuds et liens) sont pondérés par une valeur (Fig. 15).

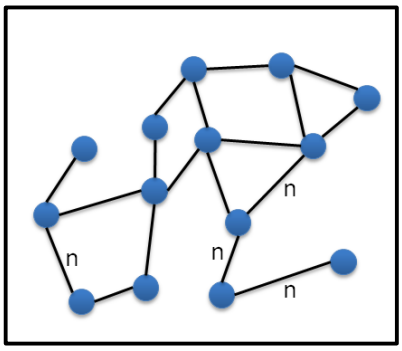


Figure 15. Exemple de graphe pondéré

- **Multigraphe :** graphe admettant plusieurs liens pouvant relier deux mêmes nœuds (Fig. 16).

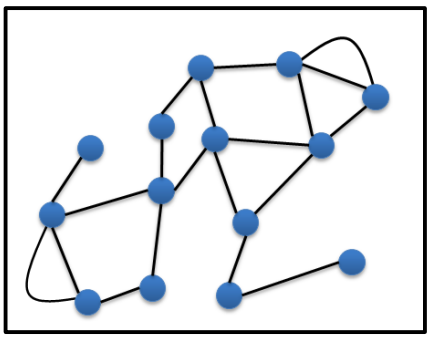


Figure 16. Exemple de multigraphe

2.1.2.2 Propriétés vectorielles et géométriques

Le graphe n'a pas uniquement des propriétés topologiques, il est possible d'ajouter des propriétés vectorielles et géométriques. Un graphe possédant des propriétés vectorielles est un graphe orienté, un graphe possédant des propriétés géométriques est un graphe spatial. Ces propriétés sont très utiles dans le cadre de l'étude des réseaux de transports et permettent d'appréhender les orientations ainsi que les distances.

Un graphe orienté signifie que les arêtes (ou liens) ont un sens entre les composants qu'elles relient. Elles peuvent être orientées par un sens unique ou être orientées dans les deux sens. Cette propriété est importante pour la compréhension des chemins à l'intérieur du graphe et donc la modélisation des flux.

Un graphe spatial est un graphe qui associe pour chaque nœud des coordonnées spatiales, généralement en 2 dimensions. Les graphes ayant la même structure topologique (connexité et connectivité) mais des propriétés géométriques différentes sont appelés isomorphes. Ainsi les graphes sont un outil complet pour décrire les propriétés spatiales d'un réseau (Buisson, 1990). Ils peuvent contenir l'ensemble des propriétés spatiales topologiques (connexité, frontières,

intérieur), métriques (distance) et vectorielles (direction, proportionnalité, parallélisme) afin de décrire un réseau dans un espace euclidien,

2.1.2.3 Propriétés relationnelles : les logiques de déplacement

Les graphes sont principalement utilisés pour leurs propriétés relationnelles. Ces propriétés basées sur la notion de chemin (un parcours sur un réseau) et de cycle (un parcours ayant la même origine et destination) permettent l'étude des relations entre les diverses parties des graphes. Ces mises en relations sont appelées logiques de déplacement.

Une logique de déplacement est définie par Gleyze (2005) comme l'ensemble des critères régissant la mise en relation des nœuds sur le réseau. La logique de déplacement la plus utilisée dans l'étude des réseaux est la logique des plus courts chemins, c'est-à-dire la recherche du chemin ayant la distance minimale entre les deux points.

Zavitsas (2011) démontre dans ses travaux que l'algorithme de Moore-Dijkstra est le plus adapté et efficace pour les graphes parmi les différents algorithmes permettant de trouver le chemin le plus court (Bellman-Ford, Floyd, A-Star). Gleyze (2005) utilise également cet algorithme dans son étude. Il précise cependant que d'autres logiques de déplacements peuvent également exister.

L'algorithme de Moore-Dijkstra fonctionne sur un graphe pondéré et fonctionne par étape. Pour chaque étape de calcul, l'algorithme va chercher le plus court chemin en fonction des mesures qu'il a déjà évaluées. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir distinguer plusieurs routes possibles en cas d'égalité de distances entre les chemins. C'est donc un algorithme exhaustif car il prend en compte l'ensemble des étapes intermédiaires dans le chemin.

2.1.2.4 Formalisation algébrique des réseaux

Les structures des réseaux peuvent être étudiées sous forme de matrice. Il existe deux types de matrices principales pour l'étude des réseaux en géographie (Gleyze, 2005) : les matrices d'incidences et les matrices d'adjacences.

Une matrice d'incidence suffit à décrire les propriétés topologiques du graphe : la connexité et la connectivité. Elle décrit les relations nœuds-liens. Les lignes renseignent sur le nombre de nœuds et les colonnes, le nombre de liens du graphe. Une matrice d'incidence doit par définition toujours avoir une somme égale à zéro, pour cela chaque relation est notée 1/-1 en fonction de la numérotation des nœuds.

La matrice d'adjacence est une matrice d'incidence nœud à nœud qui rend compte de la relation pondérée entre les nœuds. Dans le cas d'un graphe non-orienté, la relation est enregistrée dans les deux sens. Dans le cas d'un graphe pondéré, elle précise la valeur de la pondération. Ces matrices peuvent être construites en fonction de la question étudiée.

Ces matrices permettent le traitement de l'information contenue dans les graphes. C'est à partir de ces matrices qu'il est possible d'utiliser les algorithmes de plus courts chemins comme l'algorithme de Moore-Dijkstra décrit précédemment.

2.1.3 Propriétés globales des graphes

Lhomme (2012) propose une typologie décrivant les différents types de graphes en fonction de leurs propriétés topologiques et géométriques. Le premier type de réseau est le réseau aléatoire, qui se définit comme un réseau ou l'existence d'un lien est indépendant de l'existence des autres. Cependant, Lhomme (2012) précise que ce type de graphes est peu commun dans la nature.

Le deuxième type, les réseaux du petit monde (*small world network*), sont des réseaux définis par le fait que les nœuds possèdent un degré de séparation restreint par rapport aux nombres de liens. Mathématiquement, ces réseaux décrivent deux propriétés distingues mais liées : une distance moyenne entre deux nœuds qui est proportionnelle au logarithme du nombre de nœuds, ainsi qu'un grand nombre de structures proches des cliques, c'est-à-dire des parties de sous-graphes où tous les nœuds sont reliés (des regroupements). Le réseau du petit monde possède un coefficient de clustering, ou un taux de regroupement, bien plus important qu'un réseau aléatoire. Les propriétés du petit monde, qu'on retrouve dans beaucoup de réseaux, se situent entre un graphe régulier et un graphe aléatoire, avec un taux d'éloignement faible (la moyenne des plus courts chemins entre tous les nœuds du graphe) et un coefficient de clustering fort.

Enfin le troisième type de réseau correspond aux graphes invariants d'échelles (*scale-free network*) c'est-à-dire des réseaux dont la distribution des degrés n'est pas gaussienne mais suivent une loi de puissance. Cette propriété est très souvent étudiée et se retrouve dans beaucoup de réseaux observés dans la nature, comme par exemple le réseau internet, World Wide Web, qui possède cette propriété. Ce troisième type de réseau n'est pas incompatible avec les deux autres, en effet un réseau peut être aléatoire et invariants d'échelles, ou encore posséder à la fois la propriété du petit monde et celle de l'invariance d'échelle. Selon (Boccaletti *et al.*. 2006) ces deux propriétés présentées, la propriété du petit-monde et celle de l'invariance

d'échelle sont les plus importante dans la caractérisation des potentialités relationnelles des réseaux.

2.1.3.1 Usage des graphes pour la modélisation des réseaux de transport

L'ensemble de ces propriétés topologiques, géométriques et relationnelles sont nécessaires à la modélisation des réseaux de transport. En effet, la théorie des graphes permet de modéliser n'importe quel type de réseaux : les réseaux sociaux, économiques, électriques, biologiques… Cependant, la modélisation des réseaux de transport demande quelques spécificités. Les réseaux de transports sont des réseaux spatiaux, à savoir des réseaux dont les composantes correspondent à des positions dans l'espace euclidien (Barthélemy 2011). En effet, les réseaux de transport sont caractérisés par leurs inscriptions dans l'espace. Ainsi, outre les propriétés topologiques, la construction du réseau doit également prendre en considération la géométrie du réseau.

Pour cela, ces réseaux spatiaux évoluent dans un espace euclidien, de dimension 2, ce qui permet de prendre en compte l'ensemble des propriétés topologiques, métriques et vectorielles nécessaire à la formalisation des réseaux de transport maritime.

2.1.3.2 Typologie des réseaux par niveau de structuration : les graphes spatiaux

Cependant les graphes spatiaux présentent différentes formalisations en fonction du réseau de transport représenté. Les graphes spatiaux utilisées en géographie pour modéliser les réseaux de transports, les réseaux sociotechniques ou encore les réseaux économiques (Bahoken et Drevelle 2013).

2.1.4 Modélisation du réseau maritime par la théorie des graphes

Les études de Ducruet (2013) montrent que ce réseau formé par les différents ports est à la fois un réseau invariant d'échelle et un réseau du petit-monde, démontrant un réseau maritime hiérarchisé. Cette hiérarchie des ports est ainsi déterminante sur la forme du réseau maritime.

Cependant, peu de travaux ont été réalisés sur la modélisation des réseaux maritimes via l'usage de graphes, ceux-ci seront présentés dans la partie suivante. Selon Ducruet (2013), 3 principales questions concernent directement la modélisation des réseaux maritimes. Premièrement la question des propriétés topologiques des réseaux et leurs visualisations. Deuxièmement, la configuration du réseau maritime ainsi que l'influence des espaces terrestres dessus. Enfin, l'identification de groupes structurants (régions mondiales, façades, clusters) qui constitue une troisième question de recherche.

Parmi les travaux sur le réseau maritime utilisant la théorie des graphes, il est possible de citer Brocard, Joly, et Steck (1995), Veenstra, Mulder, et Sels (2005), Hu et Zhu (2009), Kaluza *et al.*. (2010) ainsi que les travaux de Ducruet (2013). Joly (1995) a été le premier à modéliser les réseaux maritimes à l'aide de la théorie des graphes, à partir des données de la société d'assurance navale Llyods. Dans sa modélisation, chaque point correspond à un nœud et chaque port à un lien. Les travaux de Veenstra *et al.* (2005) cherchent à modéliser les réseaux maritimes en 3 niveaux : le premier niveau correspond aux infrastructures « tangibles » du réseau, à savoir les ports. Le second niveau correspond aux ports utilisés par les transporteurs maritimes en fonction des modalités des ports, et enfin, le troisième à une quantification du niveau précédent par plusieurs unités (volumes transportés, fréquences des transports, etc…). L'objectif de leurs recherches est de mesurer l'attractivité d'un port à l'intérieur d'un réseau.
Hu&Zhu (2009) proposent également une modélisation des réseaux maritimes. L'objectif de leur étude est de démontrer la forme du réseau maritime mondial et leurs propriétés topologiques. Ils démontrent que le réseau maritime mondial est un réseau du petit monde qui se caractérise par la présence de cliques (liés aux routes pendulaires) et que le réseau est également invariant d'échelle (*scale-free network*), c'est-à-dire que ces structures suivent une loi de puissance, avec des nœuds avec de forts degrés de corrélations (hubs) et d'autres plus faibles (spokes). Pour cela les auteurs proposent deux types de modélisation représentant les lignes pendulaires. Xu *et al.* (2015) quant à eux, proposent une formalisation par regroupement de façades maritimes.

Enfin, dans les travaux de Ducruet (2013) les réseaux maritimes sont modélisés par la méthode des multigraphes (un graphe permettant un nombre illimité de liens entre les nœuds) afin de hiérarchiser les ports entre eux. En résulte une hiérarchisation des ports et des routes maritimes et de régions nodales interconnectées entre elles.

2.1.4.1 Prise en compte de l'espace dans les modélisations

Ces travaux présentent cependant des limites quant à la modélisation de l'espace. En effet les modélisations proposées utilisent les ports comme nœuds, et les routes comme liens (Fig.17). Ces modèles ne donnent alors aucune information sur le territoire maritime traversé entre les différents ports. Seules exceptions, certains passages comme les canaux (Suez, Panama) sont utilisés dans la modélisation de Ducruet (2010). Dans sa modélisation, Zavitsas (2011) utilise le chemin le plus court entre le port de départ (offre) et d'arrivée (demande) au travers d'une matrice coût-distance et justifie ce choix par le manque d'information disponible sur le territoire

maritime. Veenstra *et al.* (2005) ne modélisent pas les routes maritimes car ils ne considèrent pas l'espace maritime comme un espace physique « *There are no physical links between airports and between seaports that have the characteristic of a line* », à savoir qu'il n'y a aucun lien physique entre deux ports (Veenstra *et al.*, 2005). Quant aux travaux de Hu&Zhu (2009), ils font abstraction de l'espace.

Ainsi, la réflexion sur l'espace est absente ou non traitée dans les travaux sur la modélisation des flux maritimes et de son réseau. Ces modélisations du réseau ne permettent pas de comprendre l'influence de la structure de l'espace sur la vulnérabilité générale du réseau. En effet, mesurer l'influence des ports entre eux et leurs propriétés topologiques n'est pas suffisant dans le cadre de cette recherche. Pour cela, il va être nécessaire d'intégrer les éléments structurant du territoire maritime pour formaliser un réseau capable de représenter la topologie et la géométrie de l'espace maritime.

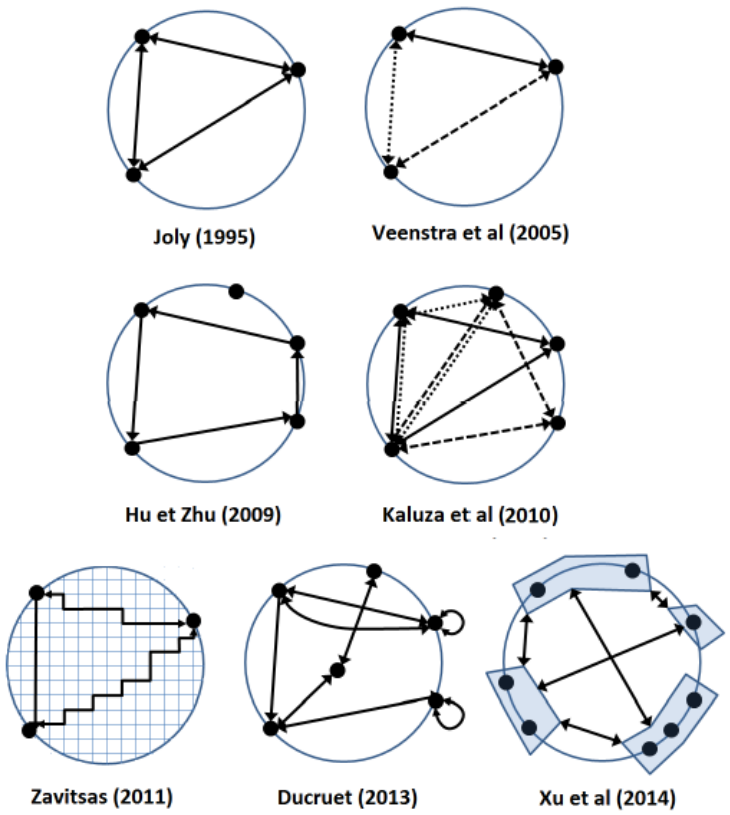


Figure 17. Représentation des modélisations de l'espace maritime dans la littérature

2.1.4.2 Sources d'information pour la modélisation des réseaux de transport maritime

Plusieurs sources d'information existent afin de modéliser le réseau maritime. En effet, les études existantes utilisent des données soit géographiques, soit économiques afin de modéliser le réseau maritime.

Données géographiques

Plusieurs études utilisent des données géographiques, à savoir la localisation des navires à un instant précis, afin de modéliser le réseau de transport maritime. Les sources utilisées étant :

AIS : L'AIS (Automatic Identification System) est un système de message entre les navires et les organismes de surveillance, utilisant le signal radio VHF, permettant d'obtenir la position des navires. Kaluza *et al.* (2010) utilisent l'AIS afin de modéliser le réseau de transport et d'étudier la structure du réseau maritime. Ces données sont généralement récupérées auprès d'organismes chargés de la surveillance maritime (CROSS) bien qu'elle puisse être également récupérée à travers l'utilisation d'une antenne personnelle.

Données des compagnies : Les compagnies maritimes enregistrent tous les déplacements de leurs navires et certaines d'entre elles les publient sur internet. Deng *et al.* (2009) utilisent ces données de différentes compagnies maritimes (MSC, APL, ANL, COSCO) afin de modéliser le réseau maritime.

Rapport annuel : Certains rapports annuels produits par des entités internationales (IMO, IAPH, UNCTAD, OMC) ou nationales, publient des données qui peuvent être réutilisées pour la modélisation du réseau. Ces données peuvent être publiques et publiées sur les sites internet des organismes concernés.

Lloyd List Intelligence : La Lloyd List Intelligence est une base de données existante depuis 1734. Il s'agit de la base de données la plus complète sur le transport maritime, regroupant plusieurs sources d'informations incluant l'AIS ou les données recueillies auprès des compagnies et de l'administration des ports. Ducruet (2013) utilise cette base de données pour étudier la hiérarchisation des ports et la forme du réseau maritime.

Il est également possible de modéliser un réseau maritime à posteriori en utilisant les données économiques de chaque pays. Zavitsas (2011) utilise les données d'offre et de demande en énergie de chaque pays et les associe au port ou la raffinerie la plus proche du centroïde du

pays. Par cela, chaque port (entrée du réseau) possède un niveau d'offre et de demande. Un modèle gravitaire permet ensuite de mesurer les voyages à effectuer dans l'espace maritime.

2.2 Mesures des propriétés des graphes spatiaux

Ces propriétés spatiales des réseaux de transport, permettent de mesurer la forme du graphe et donc les propriétés globales (*small-world*, *scale-free*, etc) des réseaux. Ces mesures, peuvent être utilisées pour mesurer les capacités relationnelles de la structure du graphe. Et ce sont ces mesures des capacités relationnelles qui vont permettre de déterminer le niveau d'accessibilité du réseau.

2.2.1 Les notions de centralité et d'accessibilité dans un graphe spatial

Les mesures de la structure du graphe sont toutes basées autour des notions de centralité et d'accessibilité. La notion de centralité est liée à la notion d'accessibilité du fait que les nœuds centraux (relatif à leur position à l'intérieur de la structure du graphe) sont les plus accessibles. Freeman (1978) distingue trois propriétés permettant de définir le degré de centralité d'un nœud : la propriété de degré, qui est fonction du degré de distribution du point, la propriété de proximité, qui équivaut à la distance cumulée des autres nœuds du réseau minimal et enfin la propriété d'intermédiaire, c'est la dire, le fait de se retrouver sur les routes les plus empruntées. La seconde notion est la notion d'accessibilité. En effet, «l*'accessibilité se réfère en général à une ou plusieurs localisations et mesure la facilité d'un lieu à être rejoint par un acteur, une clientèle, une information ou un service* » Selon Martinelli *et al.* (2000), la notion d'accessibilité exprime ainsi l'offre de possibilités de déplacement données par un système quelconque. L'accessibilité peut être « relative » et faire référence au degré de séparation spatiale entre deux lieux, ou « intégrale », et faire référence à la séparation entre un lieu et l'ensemble des autres localisations (Gleyze, 2002).

2.2.2 Mesures principales

Ces mesures, reflétant le niveau d'accessibilité et de centralité dans le graphe peuvent être divisées en deux groupes : les mesures locales, s'intéressant au positionnement relatif d'un composant à l'intérieur du réseau et les mesures globales permettant de mesurer les capacités relationnelles de l'ensemble du réseau.

2.2.2.1 Mesures locales

Les mesures locales sont utilisées pour connaitre l'importance (la centralité) d'un composant du graphe à l'intérieur du réseau. Ducruet (2014), Rodrigue (2013) ou Barthelemy (2011) mettent en avant 4 mesures fondamentales pour chaque nœud du graphe :

- **Centralité de degré (ou d'ordre)** : mesure pour chaque nœud le nombre de liens auquel celui-ci est rattaché. Cela permet de mettre en évidence les composants ayant la plus grande connectivité dans la structure du graphe.

- **Centralité d'intermédiarité (ou indice de Shimbel, accessibilité nodale)** : mesure pour chaque nœud, la somme des plus courts chemins passant par ce nœud pour relier deux nœuds dans le graphe. C'est-à-dire que plus le nœud sera une étape intermédiaire entre deux autres, plus il aura une centralité d'intermédiarité importante.

- **Excentricité (ou nombre de Koenig)** : l'excentricité mesure la somme des distances qui sépare un nœud du reste de l'ensemble des autres nœuds du graphe.

- **Coefficient de clustering** : mesure le degré de dépendance aux cliques de chaque nœud en fonction du nombre de triangles formés par les liens du graphe. Plus le coefficient est fort, plus le nœud est dépendant de son entourage.

2.2.2.2 Mesures globales

Les mesures globales prennent en considération l'ensemble du réseau, cela permet de déterminer les propriétés générales du réseau (réseau du petit monde, réseau invariant d'échelle). Ces mesures sont globales et permettent de comparer la structure du graphe et de faire des comparaisons dans le temps. Outre la mesure du diamètre du graphe (la somme des plus courts chemins), Rodrigue (2013) liste 7 indices permettant de mesurer les propriétés spatiales globales du graphe :

- **Coût :** mesure la longueur totale du graphe, en fonction des distances de transport réel. Pour cela, à chaque lien du graphe est ajoutée une valeur. Cela permet d'obtenir un arbre de longueur minimum reliant l'ensemble des nœuds du réseau.

- **Indice de détour :** mesure la différence entre la distance pour relier l'ensemble des nœuds et la distance réelle « à vol d'oiseau » des différents nœuds du graphe. Cela permet de mesurer le niveau de « friction » de la distance liée à la structure du réseau. Cependant ce type de mesure est principalement utilisé dans le cadre des réseaux d'infrastructure.

- **Densité du réseau** : mesure la longueur totale du réseau par rapport à l'espace total occupé par le réseau.

- **Indice Pi** : il correspond au rapport entre la longueur totale du graphe et son diamètre (la longueur du chemin le plus court des deux nœuds les plus éloignés topologiquement). Cela permet de donner une indication quant à la forme du graphe.

- **Indice Eta** : longueur moyenne des liens, à savoir la longueur totale du graphe divisée par le nombre de nœuds.

- **Indice Theta** : mesure le trafic moyen par intersection dans le graphe.

- **Indice Beta** : mesure la connectivité du graphe, à savoir le rapport entre le nombre de liens par rapport au nombre de nœuds. Si le rapport est inférieur à 1, cela signifie que plusieurs nœuds du graphe ne sont pas connexes au reste du graphe, ou que le réseau est un arbre. Un réseau où tout nœud est connecté sans doublon a valeur de 1. Une grande partie des réseaux de transport ont un indice beta supérieur à 1.

- **Indice Alpha (ou coefficient de maillage)** : mesure le nombre de cycles dans le graphe en comparaison au maximum possible de cycles. Ainsi, un graphe complet a un indice alpha de 1 et correspond à la connectivité maximale possible pour un graphe.

- **Indice Gamma :** correspond au rapport entre le nombre de nœuds et le nombre de liens. Tout comme l'indice Alpha, un graphe complet aura un indice Gamma de 1. C'est un indice principalement utilisé pour mesurer l'évolution du graphe dans le temps.

2.2.3 Evaluation des réseaux par les mesures existantes

Ces indices, locaux et globaux, permettent l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux. En effet, la vulnérabilité des réseaux se définit comme la capacité du réseau à garder ces potentialités relationnelles, dans le cadre d'une perturbation.

2.3.3.1 Les perturbations du réseau

La modélisation des perturbations, événements modifiant les propriétés spatiales et temporelles du réseau peut se faire via la modification de la structure du graphe. Pour cela, les perturbations sont généralement testées à partir d'ablation ou d'une modification d'une partie du graphe.

Ablation : l'ablation consiste à tout simplement enlever un nœud ou un lien de la structure relationnelle. Dans le cas d'un nœud, l'ablation concerne autant le nœud que l'ensemble des liens reliant le nœud au reste du graphe (Fig. 18).

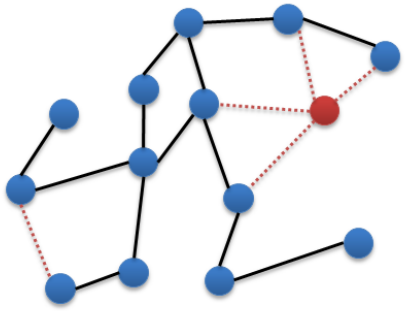


Figure 18. Ablation de composants d'un graphe

Modification : les modifications de la structure du graphe peut être qualifiées de perturbation. Ainsi les modifications topologiques (nouveaux liens) ou géométriques (modification de la longueur d'un lien, déplacement des nœuds) sont considérées comme une perturbation (Fig. 19).

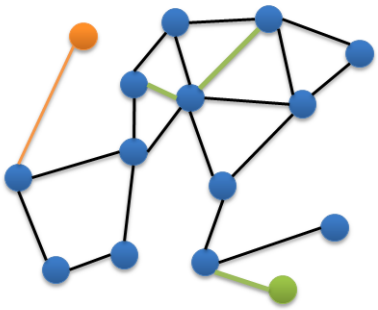


Figure 19. Modification d'un composant d'un graphe

Dans le cadre de graphe pondéré, les informations attributaires liées aux nœuds sont également des modifications, et peuvent prendre en considération le changement dans la structure du graphe. Une fois ces modifications effectuées, il est possible de comparer la structure des graphes et de comparer leurs propriétés spatiales respectives.

Ces perturbations sont liées à des événements divers ayant une influence sur la structure du réseau de transport. Dans le cas d'un réseau d'infrastructure, cela peut être la fermeture d'une route ou d'un croisement de route. Dans le cas du réseau maritime, l'ablation d'un nœud peut représenter la fermeture, définitive ou temporaire d'un port, et l'ablation d'un lien la fermeture d'une route maritime.

2.3.3.2 Mesures pour la vulnérabilité structurelle des réseaux

Gleyze (2005) distingue deux manières pour évaluer la vulnérabilité structurelle à partir d'un graphe : par sa connectivité générale et locale, ainsi que par ses plus courts chemins. La connectivité générale et locale permet de distinguer la fragilité du graphe par l'indisponibilité de certains composants. Cela fait appel à la notion d'accessibilité relative et générale. La longueur des plus courts chemins permet de distinguer l'efficacité du graphe car l'indisponibilité de certains groupes de composants contraint d'effectuer des détours importants dus à la déconnexion des composants entre eux. Pour déterminer la vulnérabilité structurelle, il distingue l'efficacité du réseau, permettant de quantifier la vulnérabilité, c'est-à-dire le degré de dégradation de la perturbation, et la sollicitation du réseau, permettant de qualifier la vulnérabilité en mesurant la réponse structurelle du réseau face à la perturbation.

La première mesure, l'efficacité du réseau, évalue la vulnérabilité du réseau face à une perturbation par la dégradation de son efficacité au niveau local et global, la perte des capacités relationnelles entrainant une perte d'accessibilité. Elle utilise l'indice d'éloignement moyen correspondant à la moyenne pondérée des longueurs des plus courts chemins. L'éloignement moyen peut être utilisé localement, et mesure pour un composant donné son accessibilité dans le réseau ou globalement, pour mesurer le niveau d'accessibilité des composants entre eux. En cas de perturbation, la perte d'efficacité globale est calculée par la longueur (en distance, temps ou coût) supplémentaire au réseau pour relier tous les points du réseau.

La seconde mesure utilisée est la sollicitation du réseau. Elle permet de comprendre l'impact de la perturbation en termes de redistribution des relations sur le réseau, en utilisant l'indice de centralité intermédiaire. Il mesure le poids total des plus courts chemins de chaque composant. Après une perturbation, cela permet de distinguer quels sont les composants qui seront sollicités

consécutivement à la perturbation et donc comprendre comment le réseau utilise sa structure pour répondre à la perturbation.

Cependant, les travaux de Gleyze (2005) se concentrent sur les réseaux urbains et routiers, et l'utilisation de ces mesures n'est pas exploitable dans le cas d'un réseau maritime du fait des propriétés spatiales de celui-ci. En effet, les réseaux maritimes n'ont pas les mêmes spécificités spatiales que les réseaux urbains, du fait de l'absence d'infrastructures de ceux-ci.

Dans l'approche de Gleyze (2005) la vulnérabilité structurelle s'appuie uniquement sur l'infrastructure et donc reste uniquement applicable aux réseaux strictement définis. Cependant, dans le cadre d'un réseau vaguement défini, d'autres logiques structurelles viennent se substituer à l'absence d'infrastructures pour donner forme au réseau comme l'économie ou le droit. La différence notable vient des possibilités de déviations offertes par l'espace du fait de sa nature libre. En cela ces mesures doivent être adaptées à une structure spatiale surfacique.

2.3 Formalisation de l'espace maritime

Cette partie s'intéresse à la modélisation de l'espace maritime et s'intéresse à sa discrétisation. En effet, le réseau de transport maritime s'étend dans un espace maritime, support aux échanges mondiaux. Cet espace, aux propriétés particulières nécessite une modélisation propre prenant en compte ces spécificités.

2.3.1 Frontières et continuum

La problématique de l'espace maritime est qu'au-delà de l'interface terre/mer, il est difficile de le différencier, le définir. Cependant, deux grandes catégories de modélisation de l'espace existent : le point de vue discret, et donc la modélisation d'objets, ceux-ci se délimitent dans l'espace par des frontières, et le point de vue continu attribuant à l'espace des caractéristiques liées à la distance.

- **Perspective discrète** : chaque objet et partie de l'espace possèdent leurs propres délimitations, 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.

- **Perspective continue** : l'espace est un ensemble continu de localisations dans lesquelles des attributs sont associés à l'espace, il n'y a pas de frontières nettes entre les différentes parties. Dans ce cas de figure, celui des champs, il y a pas de frontières aux objets. L'espace est ici encore support, mais support d'un *plenium* ou *continiuum* spatial, où

chaque position dans l'espace admet une information attributaire en fonction de la nature de celui-ci.

2.3.2 L'espace dans la modélisation

Ruas et Sanders (2015) distinguent quatre types d'espace supports pour les objets géographiques en fonction des objectifs de la modélisation :

1. L'espace en tant que support à la configuration d'objets : l'espace se modifie en fonction de l'apparition, la modification et la disparition d'objets. L'ensemble de ces configurations entraine un changement de configuration globale de l'espace.

2. L'espace support fixe comme socle immobile des objets mobiles : les objets mobiles créent alors des trajectoires d'objets et l'intérêt des recherches se situe davantage sur la modélisation des trajectoires et leurs relations entre elles plutôt que sur leurs relations avec l'espace.

3. L'espace maillé : l'espace est maillé entre différentes parties de celui-ci. Ce sont les subdivisions mêmes de l'espace qui sont ici les objets de la modélisation et l'intérêt porte sur les modifications de celles-ci dans l'espace.

4. L'espace comme support d'interactions : l'espace est support d'objets dans l'espace. Ces objets ont des interactions et le modèle se focalise sur les variations de flux des différents objets et sur l'échange d'informations dans l'espace en fonction des caractéristiques de chaque objet localisé à l'intérieur de l'espace support.

2.3.3 Structures spatiales

Plusieurs types de structure pour la modélisation spatiale ont été envisagés afin de modéliser l'espace maritime (Langlois 2010) :

1. Structure irrégulière non-topologique : Ces structures permettent d'attribuer à chaque lieu dans l'espace un niveau d'accessibilité et une zone d'influence (Fig. 20). Mais cette solution de modélisation ne fournit aucune information sur l'ensemble de l'espace, ce qui donne des « vides » à l'intérieur du médiateur spatial.

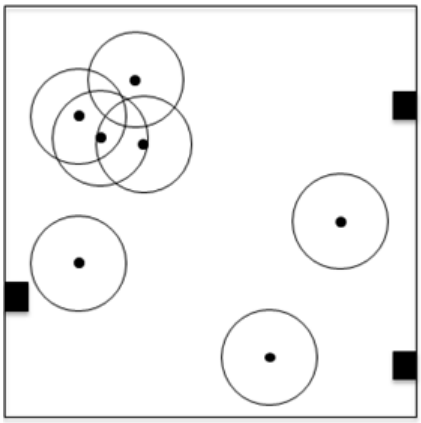


Figure 20. Structure spatiale irrégulière non-topologique (Langlois, 2010)

2. Structures topologiques en réseau : Ces structures ont la capacité de fournir des informations topologiques, mais ne peuvent pas affecter à chaque localisation un niveau d'accessibilité et de distance à un objet (Fig. 21).

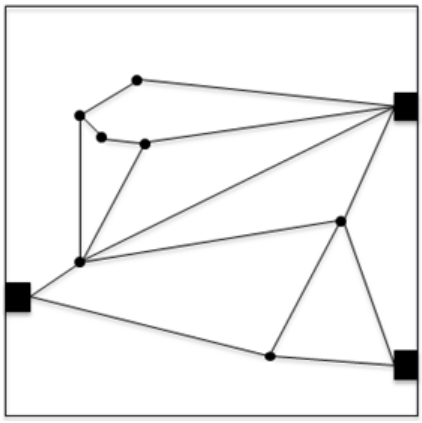


Figure 21. Structure spatiale topologique en réseau (Langlois, 2010)

3. Structures topologiques irrégulières : Ces structures peuvent être utilisées, notamment dans le cas d'une irrégularité de l'espace. Elles sont alors dépendantes des éléments qu'elles localisent. La plus utilisée de ces structures en analyse spatiale est le diagramme de Voronoi (Fig. 22)

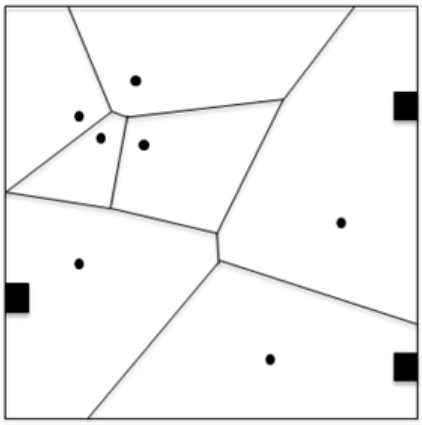


Figure 22. Structure spatiale topologique irrégulière (Diagramme de Voronoï) (Langlois, 2010)

4. Structures régulières : Ces structures peuvent prendre plusieurs types de formes : cela peut être des hexagones, triangles, rectangles ou des carrés. Ces structures régulières fournissent à la fois des informations topologiques et géométriques. Plusieurs structures ont été envisagées, mais le carré permet de prendre en compte des orientations régulières (Nord, Sud, Est, Ouest) et permet ainsi d'obtenir des trajectoires droites, plus propices à la modélisation des trajectoires des navires. Celui-ci a donc été choisi pour la modélisation de l'espace maritime (Fig. 23).

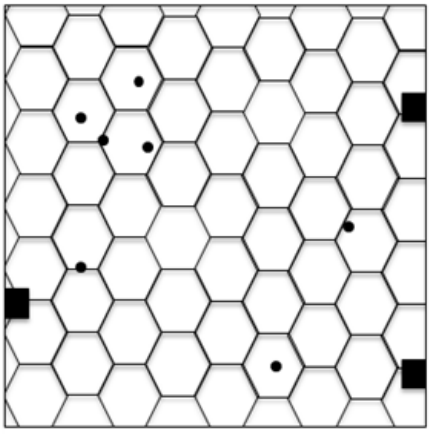


Figure 23. Structure spatiale topologique régulière (Maille hexagonale) (Langlois, 2010)

2.3.3.1 Avantages et inconvénients de chaque structure

Plusieurs modélisations de l'espace existent : de manière continue, en grille, ou en graphe (Taillandier *et al.*. 2014). Chaque type d'environnement spatial ayant une topologie différente. En continue, la topologie est dite « libre ». Dans ce type de structure, chaque agent est un objet géométrique (points, lignes, polygones) possédant une localisation propre. Chaque objet est distant des autres dans l'espace et peut se mouvoir. Ces structures correspondent aux catégories 1 et 2 de Langlois (2010).

Le deuxième type de topologie est la grille. Ces grilles peuvent avoir plusieurs formes, régulières ou non. Langlois (2010) propose plusieurs types de grilles, ou chaque cellule de celles-ci sont des agents : les structures régulières (triangles, carrés rectangles, hexagones…). Celles-ci ont pour avantage d'avoir toutes la même forme et de construire algorithmiquement la grille. La structure régulière en carré particulièrement pertinente dans le cadre d'une problématique multi-scalaire. En effet, celle-ci possède la propriété d'autosimilarité car conserve la forme de l'agent localisateur dans un fractionnement de celle-ci. Cela permet d'adapter l'échelle d'analyse (dimension des éléments localisés) à l'échelle des phénomènes (dynamiques spatiales) qui est la problématique principale du M.A.U.P (*Modifiable Areal Unit Problem*) problématique récurrente en géographie (Montello 2001). Les Quadtrees sont des structures permettant cette approche multi-scalaire.

L'autre intérêt majeur du choix d'une structure est le choix d'une mesure de distance de voisinage, notamment celle de Von Neumann et Moore (Taillandier *et al.*. 2014). Le voisinage de Von Neumann prend en compte l'ensemble des cellules ayant une arrête commune avec une cellule centrale, alors que celui de Moore, c'est l'ensemble des cellules qui ont une arrête ou un sommet commun avec la cellule centrale. Pour le reste de cette recherche, la grille carrée a été prise en considération.

2.3.3.2 Un espace topologique régulier : la grille carrée

Un espace carré quadrillé régulier prend en compte les informations géométriques et topologiques de l'espace, mais est aussi une modélisation évolutive pour la densité des éléments présents dans l'espace et leurs dynamiques.

La propriété d'auto-similarité permet d'étudier la structure de l'espace maritime à l'aide d'une échelle différente en divisant / fusionnant les carrés en fonction de la densité de l'élément des territoires dans l'espace. Il permet de faire correspondre l'échelle d'analyse, la taille des unités dans lesquelles les phénomènes sont mesurés, à l'échelle du phénomène, qui correspond à « *la taille à laquelle les structures géographiques existent et sur lesquelles les processus géographiques fonctionnent dans le monde* ».

Ainsi, ces carrés sont des zones d'accessibilité égales de l'espace maritime, et chaque cellule a son propre niveau et taille d'accessibilité, en fonction des éléments situés dans chaque cellule. La modélisation spatiale est capable de prendre en compte la dynamique en adaptant la taille et le niveau d'accessibilité des carrés. Chaque changement de taille de cellule et taux

d'accessibilité génère une nouvelle grille. Ce chiffre représente notre approche de modélisation spatiale.

2.3.3.3 Grille et réseau

Une grille spatiale, discrétisée, a toutes les propriétés spatiales pour la prise en compte d'une structure relationnelle. En effet, elle fournit des propriétés topologiques (notion de voisinage), et géométriques (distance et zonage) nécessaires à la description d'un réseau. Il est ainsi possible de transformer n'importe quel espace en un réseau via la notion de voisinage (Fig. 24). Le voisinage d'une partie de l'espace correspond aux parties adjacentes. Dans le cadre d'une structure carrée, plusieurs types de voisinages peuvent être utilisés, aussi nommés « distance ».

La notion essentielle est donc celle de voisinage : la transformation d'une surface en réseau se fait en fonction du voisinage choisi. Dans le cadre d'une structure carrée, 3 types de distances peuvent être prises en compte : les distances de Van Neumann, Moore et la distance euclidienne. La première, la distance de Von Neumann, considère comme « voisin » les quatre cellules partageant une arrête, la seconde, la distance de Moore considère pour adjacentes les 8 cellules partageant une arrête ou un point. Le principal défaut de la distance de Moore est la faiblesse topologique. Pour les déplacements entre deux points en diagonal, cela nécessite de décomposer en deux étapes, et donc rallonger les distances dans l'espace. Cette distance est également appelée distance de Manhattan. L'avantage est que l'ensemble des distances entre l'ensemble des points est identique.

Inversement, dans la distance de Moore, les distances topologiques et géométriques diffèrent, en effet, les 4 cellules situées en diagonales représentent une distance géométrique plus importante, mais la même distance topologique. De surcroit, la distance de Moore forme des graphes non-planaires, puisque qu'une intersection est créée entre chaque groupe de 4 points.

La dernière distance, la distance euclidienne, consiste à créer 8 liens topologiques autour du nœud central et de pondérer chaque lien horizontal et vertical de 1 et de racine de 2 les liens obliques. Cette distance permet ainsi de garder une structure relationnelle au graphe et de garder en proportion les distances topologiques et géométriques.

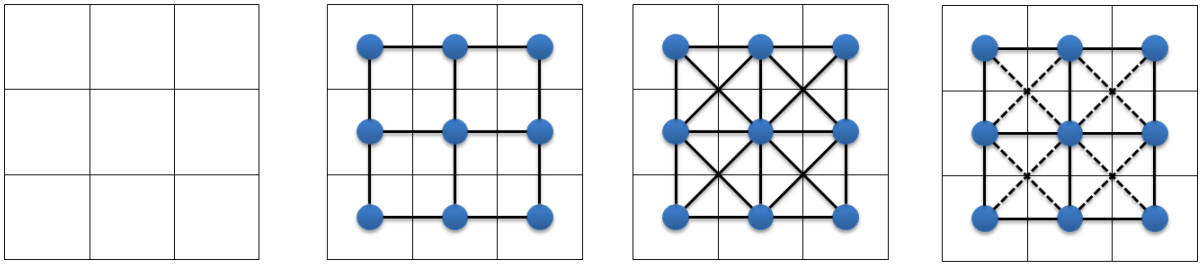


Figure 24. Transformation d'un carré avec les distances de Von Neumann, Moore et euclidienne.

2.3.4 Formalisation d'objet spatio-temporelle

Au sein de l'espace support, les perturbations sont prises en compte via des objets spatio-temporels. Ces objets constituent des barrières entrainant des baisses d'accessibilité à l'espace pouvant nuire à l'efficacité du réseau.

D'un point de vue thématique, celui d'un géographe, un objet est construit à partir de l'observation empirique (ex : un territoire, une route, un véhicule). Deux types d'objets peuvent être distingués :

- **Les objets *bona fide*** : ces objets correspondent à des objets dits naturels ayant une existence physique et matérielle.
- **Les objets *fiat*** : ces objets correspondent à des limites arbitraires, socialement construits par et pour l'homme, ils correspondent aux limites politiques, administratives, juridiques ou sociales.

(Livet *et al.*. 2010) définit ontologiquement ce qu'est une « entité permanente » en sciences de l'information géographique. Cela permet de définir ce qu'est et ce que n'est pas un objet spatio-temporel, et comment celui-ci est conceptualisé avant l'étape de formalisation et de modélisation :

- **Objets :** ils correspondent à tous types d'objets spatio-temporels, que ce soit des rivières, des routes, des zonages divers, qu'ils soient mobiles ou fixes.
- **Propriétés :** les propriétés correspondent aux caractéristiques mêmes des objets, conventionnellement dénommées « attributs » en science de l'informatique géographique. Ces propriétés peuvent être quantitatives comme qualitatives.
- **Relations :** les relations spécifient les liens existants entre ces entités (objets et propriétés, que ce soit les relations liées à la proximité, inclusion, continuité, distance) ou aux échanges existants entre ces entités (flux d'informations).

- **Evénements :** les événements caractérisent un changement d'état des entités (apparitions, disparitions, modifications)
- **Processus :** les processus font référence aux causes qui entrainent la modification des entités dans le temps (objets, propriétés, relations). Ces entités peuvent être alors utilisées soit pour être mesurées, soit pour analyser leurs changements.
- **Mesures** : les mesures permettent de spécifier les propriétés des objets (ex : superficie, densité des objets).
- **Fonctions :** les fonctions sont la caractérisation des relations entre objets, qu'ils soient liés à la proximité entre objets (similarité spatiale ou attributaire) ou à leurs interactions (les échanges et flux entre entités, le temps nécessaire pour relier deux entités dans l'espace)
- **Règles :** les règles permettent de lier un changement à un événement spécifique ou d'engendrer une suite de modifications successives des entités.

2.3.4.1 Définition d'un objet spatio-temporel

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. Ainsi afin de formaliser les perturbations, il est nécessaire de définir les objets spatio-temporels, les dynamiques associées et la prise en compte des objets dans une simulation spatialement explicite.

Peuquet (1994) définit un objet géographique par 3 axes conceptuels 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) doivent être définies. Ces modifications sont à l'origine de la dynamique des objets.

2.3.4.2 Dynamiques spatio-temporelles

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 modifient 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 : celles-ci sont endurantes, persistantes dans le temps et ne sont pas modifiées en tant qu'entité. Ce sont les propriétés de celles-ci qui peuvent évoluer, mais en gardant 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. 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 spatiales, attributaires ou relationnelles de l'entité géographique.

Ces deux types d'entités admettent cependant une évolutivité. Ces évolutions dans le temps décrivent des processus spatio-temporels (Claramunt et 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 (Fig. 25) : par expansion (augmentation de la surface de l'objet), contraction (diminution de la surface de l'objet), déformation (changement de forme 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. Temporellement, les objets peuvent être permanents, cycliques ou temporaires (Fig. 26). Dans le cas d'un objet permanent, l'objet est présent et ne peut disparaitre. Dans le cas d'un objet cyclique, l'objet admet un début de leurs processus (apparition, modification), une fin de l'objet mais dépend de processus plus larges qui feront apparaitre l'objet à nouveau. Enfin, dans le cas

d'un objet temporaire, celui-ci admet un début et une fin. Le processus amenant à l'apparition de l'objet est unique.

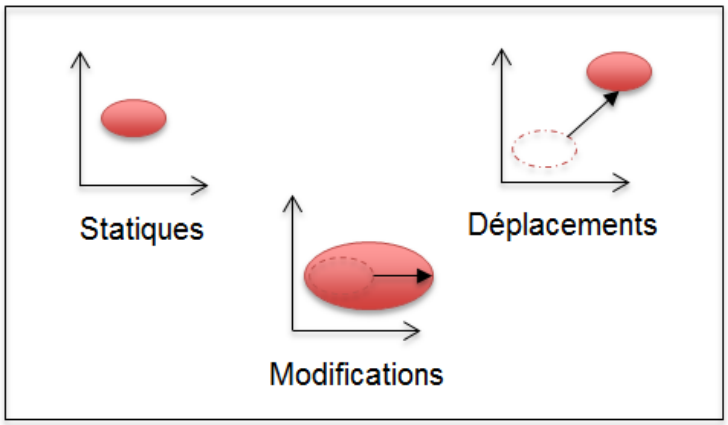


Figure 25. Typologie des dynamiques spatiales

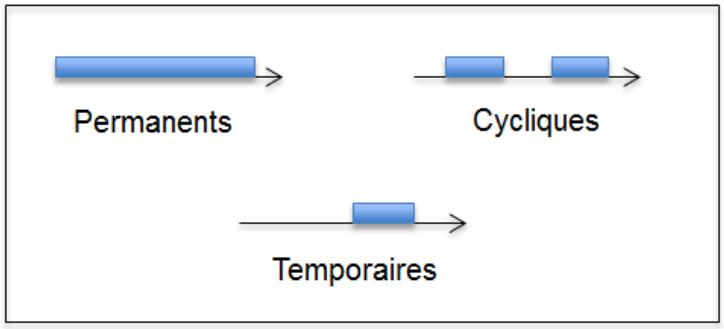


Figure 26. Typologie des dynamiques temporelles

2.4 Simulation de la vulnérabilité des réseaux de transport

Les éléments modélisés ayant été définis, l'étape suivante est de savoir comment modéliser les interactions. En effet, la vulnérabilité est liée à la fois à l'enjeu (le réseau et sa performance) et l'aléa (l'environnement et ses éléments impactant le réseau). Pour mettre ceux-ci en interaction, la simulation, en tant que méthodologie de recherche est ici utilisée pour évaluer la vulnérabilité du réseau maritime.

2.4.1 Systèmes complexes et simulation

Afin de comprendre les systèmes complexes et leur fonctionnement, il est nécessaire d'aborder les notions fondamentales permettant de définir et expliquer les systèmes complexes ainsi que l'usage de la simulation comme méthode pour l'évaluation de la vulnérabilité.

2.4.2 Définitions de la complexité

La notion de complexité regroupe une multitude de définitions référant à des domaines bien distincts, et trois générations de théories de la complexité sont successivement apparues dans

différentes disciplines (Alhadeff-Jones 2008). Le point commun entre les différents aspects développés est que la complexité pose comme postulat l'impossibilité de décrire certains phénomènes, à savoir qu'ils sont non décomposables, et que le « tout » ou le système considéré n'est pas l'agrégation de l'ensemble de ces parties. Nous nous intéressons ici à la complexité dans le cadre de systèmes complexes et leurs usages en géographie et modélisation spatiale. Ceci part du postulat que le nombre d'interactions de certains systèmes est si important qu'il est très difficile de prévoir le comportement du système malgré la connaissance des conditions initiales. En cela, ces systèmes complexes sont constructivistes dans le sens où seules les conditions initiales et les regèles d'interactions sont connues (Morin 2005), le modèle se construit durant la période de simulation, et les données de sorties sont uniquement liées aux règles d'interactions spécifiées à priori dans le modèle.

Cette notion de complexité est de plus en plus utilisée dans les recherches en géographie et géomatique (Pumain 2003) et s'applique concrètement au concept de territoire. Le territoire maritime est un espace approprié, ou de nombreuses interactions, à diverses échelles se produisent entre les diverses composantes de celui-ci (naturel, socio-économiques, juridique). Le territoire maritime, peut ainsi être décrit par un système complexe.

2.4.2.1 Notion d'auto-organisation

En systémique, la notion de complexité tend vers la notion d'auto-organisation. Celle-ci peut se définir comme une propriété propre à un système dont l'organisation n'est pas due à des forces extérieures mais de l'interaction entre ses éléments (ex : la prise de décision au sein d'une nuée d'oiseaux). Si la notion de complexité décrit les interactions nombreuses du système, l'auto-organisation fait référence au processus selon lequel les interactions locales s'organisent d'elles-mêmes et donc que la structure même du système est liée à ses interactions et non à ses conditions initiales.

L'auto-organisation décrit ainsi le processus d'interactions menant le système à une reconfiguration, donc la complexité des interactions ne permet ni de connaitre la configuration suivante, ni de retrouver la configuration initiale. Une configuration, en géographie fait référence à une structure de l'espace à un moment précis (Pumain, 2003).

2.4.2.2 Notion d'émergence

Le concept d'émergence se définit comme un phénomène collectif résultant des interactions entre des entités locales, expliquant l'apparition et la forme d'une structure émergente.

(Pumain 2003) décrit l'émergence comme la création de nouveaux éléments ou attributs du système, voir l'apparition d'une mesostructure ou macrostructure géographique résultante des interactions se produisant à une échelle locale. Enfin, la notion d'émergence est centrale dans notre problématique de recherche. L'émergence est donc un phénomène imprédictible, mais elle permet cependant d'étudier et d'expliquer le phénomène au travers de ses causes.

2.4.2.3 Définition des systèmes complexes

Casti (1994) définit un système complexe à partir de quatre propriétés : premièrement, un grand nombre de composantes doit être en interaction ce qui amène une modification du schéma d'interaction. Deuxièmement, une diffusion de l'autorité, à savoir que le système n'admet pas de règles globales, ce sont les agents, individuellement qui prennent les décisions. Troisièmement, le système n'est pas décomposable, et une partie du système ne peut fonctionner sans interactions avec les autres composantes du système. Quatrièmement, l'imprévisibilité du système. Son évolution n'étant pas déterministe, son évolution est davantage liée aux interactions produites lors de la simulation plutôt que par ses conditions initiales. Il devient ainsi difficile de tracer le cheminement du système.

2.4.3 Simulation et espace

Pour Pumain (2003), la théorie de la complexité offre la possibilité de comprendre et de formaliser l'émergence d'entités géographiques. En effet, la démarche permet de dépasser une des oppositions méthodologiques majeures de la discipline, à savoir l'opposition holisme/individualisme. En effet les deux points de vue coexistent : dans la première approche l'organisation spatiale (territoires, réseaux) est modelée par les individus alors que dans la seconde, ce sont les organisations qui déterminent spatialement les individus (leur localisation dans l'espace et leurs déplacements). Du fait du postulat de l'auto-organisation, ces approches peuvent être liées et mise en système, l'une résultante de l'autre comme rétroaction. En effet, la complexité en géographie aide à « *mieux comprendre l'intervention de niveaux intermédiaires (*émergence*) entre les représentations individuelles et la formation ou le maintien de grands systèmes sociaux*. » (Daudé, 2005). Ainsi, la complexité permet de mettre en évidence des « structures émergentes » meso-géographiques ainsi qu'une dynamique multi-scalaire entre les entités individuelles et la globalité.

2.4.3.1 Systèmes de simulation spatialement explicites

Plusieurs types de modèles complexes existent pour faire émerger des propriétés nouvelles à partir d'interactions simples. Ces systèmes complexes peuvent être modélisés sous plusieurs

formes, les trois types majeurs de simulation de systèmes complexes étant : les systèmes dynamiques, les évènements discrets et les systèmes multi-agents (Moon 2017) :

Les systèmes dynamiques (System Dynamics Modeling and Simulation) sont des systèmes ou les variables d'état des systèmes sont en permanente évolution, cela revient à utiliser des équations différentielles, et sont ainsi causales et déterministes. Ces systèmes s'adaptent cependant mal car contrairement aux systèmes multi-agents les systèmes dynamiques adoptent une approche top-down.

La modélisation d'évènement discret (Discrete Event Modeling and Simulation) se base sur des états de variables qui changent de manière discrète, à savoir dans des points séparés du temps. Ces évènements sont susceptibles d'intervenir uniquement si l'état du système change. Généralement, ce type de modèle utilise des logigrammes gérant des flux d'agents.

Enfin la modélisation multi-agents est une méthode de simulation, où les agents sont modulés dans le but d'interagir entre eux et avec leur environnement. Ces modèles sont utilisés dans le but de trouver des comportements et des structures émergentes à travers la complexité des relations existantes entre les agents et l'environnement.

2.4.3.2 Usage de la complexité dans les sciences géomatiques

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. Pour Pumain (2003) les systèmes multi-agents ont 3 atouts majeurs pour la modélisation en géographie : le rôle des acteurs individuels, les transformations des territoires et l'adaptation des territoires et de ses spécificités du fait des interactions socio-économiques existantes. En effet, la complexité géographie aide à « *comprendre l'intervention des niveaux intermédiaires (émergence) entre les représentations individuelles et la formation ou le maintien des grands systèmes sociaux* » Daudé (2005).

Ainsi, la complexité permet de mettre en évidence "les structures émergentes mésogéographiques" ainsi qu'une dynamique entre les échelles géographiques, entre les entités individuelles et l'ensemble des territoires. Pour formaliser un système multi-agents géographique, Langlois (2010) utilise le paradigme Agent/Organisation/Comportement pour l'étude de la relation existante entre les agents sociaux (navires) et des agents spatiaux (configurations spatiales maritimes). L'intérêt principal de cette formalisation est la

différentiation entre agent social et agent spatial. Les agents sociaux sont utilisés comme tout agent systèmes et l'agent spatial est utilisé pour la localisation des agents. Cette localisation peut influencer le comportement de l'agent et les agents peuvent influencer sur les propriétés des entités spatiales.

2.4.4 Systèmes multi-agents

Cette partie décrit les systèmes multi-agents. Premièrement, une description de la notion d'agent est présentée, puis deuxièmement, une description des interactions entre agents pour former des systèmes multi-agents est effectuée.

2.4.4.1 Paradigme multi-agent

Le principe de la modélisation à base d'agents est de modéliser des systèmes complexes en adoptant une approche bottom-up par une modélisation individuelle centrée. Ce système multi-agents est basé sur le concept d'agent. Un agent est une entité qui a ses propres objectifs et des capacités dans un environnement partagé (Ferber 1997; Crooks et Heppenstall 2012) énumèrent les différentes caractéristiques de l'agent :

- **L'autonomie des agents** : les agents sont des unités autonomes, capables de prendre leurs propres décisions en fonction de leurs objectifs, capacité et environnement.

- **L'hétérogénéité des agents** : les agents peuvent avoir des attributs différents (par exemple l'âge, les capacités, la fonction) qui peuvent induire un comportement différent entre les agents.

- **L'interactivité des agents** : les agents sont actifs et ont chacun une influence sur la simulation du fait de leurs propres objectifs à atteindre. Ils cherchent à atteindre ces objectifs en fonction de leur perception de l'environnement qui est limitée. Les agents ont également la compétence de communiquer entre eux afin de réaliser leurs objectifs. Ces comportements permettent aux agents d'apprendre et donc d'adapter leurs actions en fonction de leur environnement.

Ferber (1997) classe la modélisation multi-agents en 3 catégories : coexistence, la coopération et la concurrence selon l'objectif et la capacité de l'agent ainsi que les ressources de l'environnement.

Les modèles de coexistence se définissent par le fait que les objectifs des agents sont similaires et que les ressources sont suffisantes. Les modèles de coopération fonctionnent lorsque les agents ont un même but, mais les ressources ou la capacité des agents sont limitées, cette catégorie est utilisée pour les modèles de congestion ou les modèles de collaboration. La dernière catégorie, les modèles de la concurrence sont utilisés dans le cas de l'objectif en conflit, par exemple le modèle proie-prédateur.

2.4.4.2 Agent

La notion d'agent est d'abord liée à l'informatique. Son concept initial est lié à son autonomie de décision au sein d'un système ainsi qu'au caractère intentionnel de ses actions (Wooldridge 1998). Ferber (1997) définit un agent comme une entité informatique qui respecte les sept points suivants :

- Un agent se trouve dans un système informatique ouvert comprenant un ensemble d'applications, de réseau et de systèmes hétérogènes
- Il peut communiquer avec d'autres agents
- Il est mû d'objectifs propres
- Il possède des ressources propres
- Il ne dispose pas de représentation uniquement partielle des autres agents
- Il a des compétences qu'il peut offrir à d'autres agents
- Il possède un comportement qui tend à satisfaire ses objectifs, en prenant en compte d'une part des ressources et des compétences dont il dispose, d'autre part de ses propres représentations.

Un agent cherche ainsi à satisfaire ses objectifs en utilisant les compétences et ressources dont il dispose, dans une rationalité limité, à savoir une connaissance partielle de son environnement et des autres agents. Pour mieux comprendre, il est possible de comparer le fonctionnement d'un agent avec un objet (Fig. 27). Un objet étant une entité informatique possédant un certain nombre de services (méthodes) exécutés :

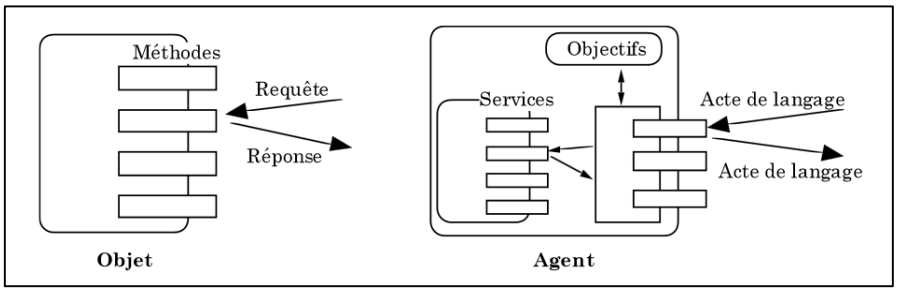


Figure 27. Comparaison de fonctionnement entre un objet et un agent (Ferber, 1997)

La différence majeure est la capacité de l'agent à communiquer avec d'autres agents et avec son environnement (l'ensemble du système). En fonction de ces objectifs, celui-ci exécutera ou non différentes actions, dans la mesure des possibilités que les autres agents et son environnement lui transmet comme information.

2.4.4.3 Systèmes multi-agents

Un système multi-agents va ainsi s'intéresser aux interactions entre les agents et leurs relations avec leurs environnements respectifs, et dans notre cas de figure, aux interactions spatiales. Un système multi-agent se définit comme un programme informatique composé d'agents, des entités informatiques autonomes capables d'agir sur elles-mêmes et sur leur environnement. Dans un système multi-agents, l'agent peut communiquer avec d'autres agents et se déplacer, sauf si son environnement ne lui permet pas. Le comportement des agents est la conséquence de ses observations d'agents, de ses compétences propres et de sa relation avec les autres agents et son environnement (Daudé, 2005).

L'utilisation de systèmes multi-agents s'est progressivement développée à partir des années 1970. Ferber (1997) distingue quatre leviers qui ont progressivement imposé l'utilisation des SMA : premièrement, la limitation de l'intelligence artificielle à structurer les connaissances, la difficulté de modélisation dans certaines sciences, notamment les sciences du vivant, le développement de la robotique et des études sur la coopération entre robots ainsi que le développement de l'informatique en réseaux et les travaux sur les méthodes de collaboration entre machine.

Ainsi les systèmes multi-agents ont été conçus comme des modèles d'interactions qui cherchent à révéler la dynamique du phénomène, qui est le produit de ces interactions. Wooldridge, Jennings, et Kinny (2000) distinguent 3 types d'utilisations principales aux systèmes multi-

gants : la simulation de phénomènes complexes, la résolution de problèmes et la conception de programmes informatiques.

Les premières simulations ont par exemple été testées pour simuler des colonies de fourmis (MANTA) des écosystèmes (SIMDELTA) ou des dynamiques interurbaines (SIMPOP). Ces modèles sont aujourd'hui utilisés dans de grand nombre de problématiques (Gilbert, 2007) : modèles urbains, dynamiques de votes, comportements des consommateurs, réseaux industriels, gestion de ces flux, marché d'électricité. Les systèmes multi-agents peuvent être avant tout classifiés en fonction des interactions qu'ont les agents entre eux et leurs environnements (Ferber, 1995) :

Objectif	Ressources	Competences	Situation	Catégorie
Compatibles	Suffisantes	Suffisantes	Indépendance	Indifférence
Compatibles	Suffisantes	Insuffisantes	Collaboration simple	Coopération
Compatibles	Insuffisantes	Suffisantes	Encombrement	Coopération
Compatibles	Insuffisantes	Insuffisantes	Collaboration coordonnée	Coopération
Incompatibles	Suffisantes	Suffisantes	Compétition individuelle pure	Antagonisme
Incompatibles	Suffisantes	Insuffisantes	Compétition collective pure	Antagonisme
Incompatibles	Insuffisantes	Suffisantes	Conflits individuels pour des ressources	Antagonisme
Incompatibles	Insuffisantes	Insuffisantes	Conflits collectifs pour des ressources	Antagonisme

2.4.5 Langage de modélisation des systèmes multi-agents

Afin de formaliser les systèmes multi-agents, et ainsi pouvoir les décrire plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Bouquet *et al.* (2015) décrivent l'intérêt de l'étape de modélisation dans

l'élaboration d'un système. Premièrement, la modélisation permet d'analyser un système et son fonctionnement en communiquant sur le modèle à travers un langage standardisé, deuxièmement l'abstraction du langage de modélisation permet de passer outre les contraires liés aux limitations de l'informatique et troisièmement, cela permet une étape intermédiaire permettant de faciliter la génération du code pour l'implémentation du modèle. Il s'agit donc d'une étape indispensable dans le cadre de la conception d'une démarche de modélisation et permet de faire le lien entre la conceptualisation, abstraite et théorique, et l'implémentation, concrète et formelle.

Deux langages de modélisation sont ici considérés : UML et AML. Le protocole ODD sera également décrit, mais il s'agit davantage d'une méthodologie de description des modèles à base d'agents.

2.4.5.1 UML

UML (*Unified Modeling Language*) est le langage de modélisation informatique le plus répandu et utilisé pour la modélisation de modèles informatisés. Il a été progressivement codifié et standardisé dans les années 1990 à partir des méthodes de modélisation OMT, Booch et OOSE. UML a été mis en place afin d'être un support commun pour la modélisation des systèmes que ce soit dans le cadre de la représentation, la visualisation et la spécification des modèles. UML repose sur la description de tables appelées classes, et de leurs relations au sein d'un système. Depuis 2013, UML est à la version 2.5 et le langage est régulièrement mis à jour.

UML propose des « superstructures » à savoir plusieurs types de diagrammes permettant la description des modèles. En effet, il propose 6 diagrammes de structure : à savoir les diagrammes de classes, d'objets, de structures composites, de composants, de déploiement et de packages. 3 diagrammes de comportements : les diagrammes d'activités, de cas d'utilisation et de machines d'états. Et enfin 4 diagrammes d'interactions : les diagrammes de séquences, de communications, de vue d'ensemble et de timing (Bouquet *et al.*, 2015).

Plus spécifiquement, les diagrammes de classes, qui représentent de manière statique les classes et les relations et les diagrammes d'objets, représentant les objets et leurs relations sont ici explicités, ceux-ci sont en effet les plus utiles afin de représenter la structure d'un système multi-agents.

Diagramme de classes

Les diagrammes de classes représentent la catégorie de diagramme la plus utilisée, c'est en effet le diagramme qui permet de modéliser la structure, et donc de décrire le fonctionnement, du modèle (Muller, 2000). Une classe correspond à des caractéristiques communes d'un ensemble d'objets. Elle est décrite en 3 parties (Fig. 28) : son nom, ses attributs (ensemble de propriétés liées au type d'objet de la classe) et enfin des méthodes (ou opérations), à savoir des fonctions permettant d'opérer sur les données liées aux attributs de la classe.

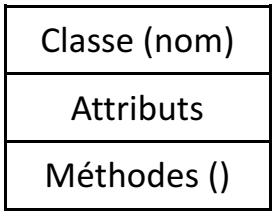


Figure 28. Entité sous UML

Dans un système, les classes ont des relations entre elles. En UML il existe deux types principaux de relation : l'héritage et l'association. L'héritage correspond à un ensemble d'attributs et méthodes héritées d'une autre classe. Par exemple, si les navires sont considérés comme une classe, ils peuvent hériter d'attributs et de méthode liée à une autre classe « véhicule » plus générique, ayant pour attributs certaines valeurs du navire (direction, vitesse…)

L'association a pour but de spécifier la relation entre les classes au travers deux notions distinctes : la cardinalité de la relation et la direction. La cardinalité exprime une information de multiplicité entre les classes. Celles-ci peuvent de 1, de 0 ou 1, de M à N (valeurs d'entiers naturels), de 0 à plusieurs (représenté par le symbole *), ou de 1 à plusieurs. La direction exprime le lien existant entre les deux classes, certains sont spécifiques comme les agrégations (associations asymétriques) ou les compositions (une classe représente un attribut d'une autre). Les agrégations sont représentées par des losanges blancs et les compositions par des losanges noirs. Quant aux navigations, ce sont des associations simples, qui peuvent être unidirectionnelles (flèche simple) ou bidirectionnelles (simple trait).

Diagramme d'objets

Le diagramme d'objets permet de représenter des classes instanciées. Celui-ci peut être particulièrement utile dans le cadre d'un système de simulation pour modéliser l'état initial de

la simulation. Par instanciation, il faut entendre qu'il est possible de donner une valeur aux attributs des classes d'objets dans le diagramme et la représenter.

2.4.5.2 AML

Si UML est un langage standardisé et répandu, d'autres langages permettent la modélisation de système multi-agents, précisément mis en place pour les modèles à base d'agents. Le langage AML (*Agent Modelling Language*) a été spécifiquement mis en place pour la modélisation au travers le paradigme Agent-Rôle-Groupe et permettre la modélisation des interactions entre les agents. Conceptualisé et proposé par Cervenka et Trencansky (2007), c'est un langage semi-formel adapté à la description des agents, de leurs comportements et de leurs relations avec leurs environnements. Il permet d'une part la modélisation « statique des agents » hérité de l'UML et d'autre part la modélisation « dynamique » des interactions entre agents (Trencansky et Cervenka, 2005).

Les entités en AML (Fig. 29) sont gérées comme en UML : à chaque entité est attribuée une liste d'attributs et une liste d'opérations. La spécificité vient dans la formalisation de comportements qui sont des opérations liées à l'objectif de l'entité modélisée.

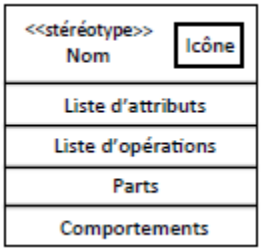


Figure 29. Entité sous AML

Comme en UML les entités ont une liste d'attributs et d'opérations, mais également une « part » et un « comportement ». Le champ « parts » permet de définir l'agent au sein d'une organisation d'agents, quant au champ comportement il définit des actions complexes composées de plusieurs opérations voire plusieurs autres comportements. Il existe 5 types de classes qui peuvent être instanciées en AML : les agents, l'environnement, les ressources, les organisations et les rôles.

L'environnement représente l'espace dans lequel évoluent les autres entités, les ressources sont des entités sans comportements et dynamiques mais utilisées par les agents pour atteindre leurs objectifs, les rôles sont des caractérisations spécifiques de certains agents et enfin les

organisations sont un ensemble d'agents et les attributs propres à ce groupe. (Bouquet *et al.*. 2015)

Type d'entité	Icône	Définition
Agent		Entités autonomes capables de percevoir, d'interagir et d'avoir un comportement dans son environnement
Environnement		Entités dans lesquelles évoluent les autres entités.
Ressource		Entités sans comportement propre pouvant être utilisées par les autres entités
Organisation		Ensemble d'agents formant une organisation propre.
Rôle		Entités liées à la fonction des agents dans le système.

2.4.5.3 ODD

Le protocole ODD (*Overview, Design concepts, and Details*) a été proposé par Grimm (2006). Ce protocole propose une structure de description permettant de préciser l'objectif du modèle, ses composantes, et la manière dont les propriétés des systèmes multi-agents sont prises en compte (émergence, adaptation, etc.). ODD est aujourd'hui standardisé pour décrire et communiquer sur un modèle à base d'agents.

ODD a pour objectif de fournir une vision générale du système modélisé, tant du point de vue de sa structure que de sa dynamique. Bouquet *et al.* (2015) présente plusieurs raisons majeures à la documentation et la description de modèle

- Permettre de décrire la connaissance construite par le modèle
- Expliciter la structure et le fonctionnement du modèle et lever les ambiguïtés.
- Prendre en compte la multiplicité des usagers du modèle et leur niveau de connaissances
- Intégrer la méta-connaissance de la modélisation, à savoir les connaissances empiriques du modélisateur.
- Permettre de répliquer le modèle, voire le réadapter à d'autres problématiques.

- Permettre d'accompagner pendant le cycle de développement et l'implémentation du modèle.
- Aider à développer de nouvelles formes de visualisations du modèle.

La méthodologie de description ODD est composée de trois éléments principaux : les objectifs, la conception et les détails de fonctionnement.

1. Vue d'ensemble	Objectif	Préciser l'objectif du modèle
	Entités, variables d'état et échelles	Les entités du modèle, leurs caractéristiques et échelle.
	Processus et ordonnancement	Evolution des entités pendant la simulation
2. Conception	Principe de base	Quels sont les concepts et hypothèses de base du modèle ?
	Emergence	Quels sont les phénomènes émergents non-prévisibles ?
	Adaptation	Comment les entités évoluent en fonction de la modification de l'environnement ?
	Objectif	Quels sont les objectifs des agents ?
	Apprentissage	Les agents apprennent-ils durant la simulation ?
	Prédiction	Comment évaluer les conséquences des décisions des agents ?
	Sensibilité	Quelles sont les informations disponibles pour les agents ?
	Interaction	Quelles sont les interactions entre les composantes du modèle ?
	Stochasticité	Quelles sont les variables incertaines ?
	Organisation collective	Quelles sont les propriétés communes aux agents ?
	Observation	Quels sont les indicateurs utilisés pour évaluer la simulation ?
	Initialisation	Quel est l'état de la simulation à l'initialisation ?

3. Détails	Données d'entrée	Quelles sont les données d'entrée du modèle ?
	Sous-modèles	Quels sont les sous-modèles pour faire fonctionner la simulation ?

Ces 3 composantes ont une fonction distincte dans la description du modèle :

1. **Vue d'ensemble** : la vue d'ensemble a pour but de décrire d'une manière synthétique la structure et la dynamique du modèle pour y comprendre le fonctionnement général. Pour cela la vue d'ensemble a une section « Objectif » qui décrit les raisons de la modélisation du modèle, sa finalité. La seconde section « Entités, variables d'état échelle » décrit les différentes entités en jeu dans le modèle (agent, environnement, échelle spatiale et temporelle). Enfin la dernière section « Processus et ordonnancement » décrit le processus du modèle à savoir les principes de changement des entités à chaque pas de temps et les évolutions de l'environnement de simulation.

2. **Conception :** Cette partie renseigne et précise spécifiquement les aspects complexes du modèle (émergence, adaptation, interactions, etc.) et comment ceux-ci adviennent dans le modèle. Celle-ci est déclinée en 11 sous-parties permettant de décrire les mécanismes du modèle afin de faire ressortir ces propriétés de système complexe. L'ensemble de ces éléments n'est pas obligatoirement utilisé, en fonction de la conception, une ou plusieurs catégories peuvent ne pas être pertinent à renseigner.

3. **Détails :** Cette partie décrit les détails techniques liés à la simulation du modèle, comme sa configuration lors de l'initialisation, les données d'entrées nécessaires à son fonctionnement et les sous-modèles ou modules utilisés afin de faire fonctionner l'ensemble du modèle.

2.4.6 Outils de simulation multi-agents

Plusieurs plateformes de simulations existent afin de modéliser les systèmes multi-agents. (Crooks et Heppenstall, 2012). Kravari and Bassiliades (2015) établissent un comparatif de 24 outils de modélisation et simulation multi-agents en fonction des possibilités offertes par les outils, l'ergonomie des logiciels, le prix et la sécurité de la plateforme. Deux plateformes nous

intéressent particulièrement : NetLogo et AnyLogic. Cette partie est une comparaison entre les deux solutions.

2.4.6.1 NetLogo

NetLogo est un des outils les plus utilisés pour la modélisation et simulation des systèmes multi-agents, particulièrement pour la recherche. NetLogo utilise le langage LOGO pour réaliser le modèle. Tout est effectué à partir du codage, il n'y a pas d'interface graphique pour l'élaboration du modèle. Du fait de la simplicité du langage, les modèles sont facilement réutilisables et modifiables. Cependant, la représentation spatiale via des « patchs » reste sommaire. NetLogo présente plusieurs avantages par rapport à AnyLogic :

- **Conception/Développement du modèle :** Le développement du modèle se fait à partir du langage NetLogo basé sur du Logo, ce qui est à la fois plus libre mais également relativement plus simple qu'avec AnyLogic. L'interface est minimaliste et le développement via code convient mieux aux modèles théoriques à tester. A l'inverse, développer une méthodologie sur AnyLogic est plus compliqué, car les outils préprogrammés ne permettent pas de concevoir tous types de modèles.

- **Transmission du modèle** : l'utilisation seule du code permet de publier le modèle car la licence GNU/GPL le permet. Cela donne la possibilité de publier le code source dans un article scientifique (Lammoglia *et al.*, 2015). De plus la gratuité de l'outil permet à quiconque de pouvoir le tester et faire évoluer les modèles existants. A l'inverse, AnyLogic possède une licence commerciale, ce qui fait que pour vérifier un modèle publié, il est nécessaire d'avoir acheté la licence.

2.4.6.2 AnyLogic

AnyLogic est une plateforme utilisant plusieurs méthodes de modélisation (ABMS, SDMS,DEMS). AnyLogic est un environnement utilisant le langage Java. A partir d'un langage et d'une interface de modélisation graphique, AnyLogic propose des outils et des librairies pour réaliser les modèles. AnyLogic est le logiciel de modélisation le plus complet parmi ceux qui ne nécessite pas d'important codage. AnyLogic peut être considéré comme outil de modélisation et simulation pour plusieurs raisons :

- **Possibilités de modélisation** : AnyLogic prend en considération plusieurs types de simulations (Systèmes dynamiques avec gestion de boucles de rétroactions, simulation à

événements discrets) tandis que NetLogo est uniquement utilisé pour la modélisation à base d'agents.

• **Application à des problèmes concrets** : AnyLogic est plus puissant et est plus indiqué pour des problèmes clairement posés. Les outils préprogrammés permettent de réaliser assez vite des modèles robustes répondant à des problèmes concrets dans l'industrie (logistique, gestion de stocks, etc.). Cela rend plus facile la réalisation de modèles standards avec une très bonne interface graphique.

• **Gestion de l'espace et du temps en simulation** : plus mauvaise gestion du temps et de l'espace continu sur NetLogo. L'espace sur NetLogo est divisé en « Patchs » référencés relativement entre eux sous le type « Patchs X Y » et le temps en pas de simulation. Il est possible de faire fonctionner NetLogo en temps continu, mais cela donne des simulations biaisées, en effet le code NetLogo est constitué de boucles de code plus adaptées à un usage du temps discret. La gestion discrète du temps et l'espace rend les simulations sur NetLogo moins précises alors qu'AnyLogic maitrise aussi bien l'espace et le temps de manière discrète ou continue.

Conclusion du chapitre 2

La modélisation des réseaux est effectuée via l'utilisation de la théorie des graphes. Un graphe est un ensemble de nœuds reliés par un ensemble de liens. Les graphes permettent de modéliser les informations spatiales nécessaires à la description des graphes, grâce aux propriétés topologiques, qui permettent de décrire la connexité et connectivité des réseaux. Les propriétés vectorielles et géométriques permettent d'orienter et de pondérer les composants du graphe, permettant d'obtenir un graphe spatial. Enfin les propriétés relationnelles font référence à l'utilisation des graphes pour la recherche de chemins à travers la structure de celui-ci.

Ces graphes peuvent être mesurés par des mesures locales (relatif à un composant dans la structure du graphe) et globales (relatif à la structure même du graphe). Ces mesures globales permettent de déduire des propriétés générales du graphe et de définir les réseaux du petit-monde ou les réseaux invariants d'échelle. Les mesures locales permettent de déduire le degré de centralité dans la structure. Ils permettent ainsi d'évaluer l'importance relative d'un composant dans la structure.

Les perturbations, dans le cadre d'une étude des réseaux peuvent être mesurées via des ablations ou des modifications d'un ou plusieurs composants dans le graphe. Par ce procédé, il est

possible de déterminer la vulnérabilité du réseau à chaque composant. Il est possible de distinguer dans ce cas de figure la vulnérabilité connective, à savoir la capacité du réseau à maintenir ses propriétés relationnelles à travers ses liens, et la vulnérabilité d'accès, à savoir maintenir les lieux dont la structure relie au sein de la structure spatiale.

Ce réseau maritime étant composé des ports (nœuds) et de routes (liens), il est nécessaire pour prendre en compte les objets de l'intérieur de l'espace maritime de discrétiser l'espace et ainsi établir des lieux différenciés avec des propriétés spatiales propres. Pour cela, il existe plusieurs types de structures spatiales, régulières comme irrégulières afin de modéliser l'espace maritime. Cet espace discrétisé pouvant être transformé via sa topologie en un réseau représentant la structure de l'espace maritime et donc la structure dans laquelle la navigation peut être effectuée.

A l'intérieur de cette espace, des perturbations, modélisées comme objet spatio-temporels peuvent se déplacer au sein de cette structure. Ces objets se définissent par leurs dynamiques spatiales, on y distingue les objets statiques, en déplacements, en modifications, mais également leurs dynamiques temporelles, à savoir les objets permanents, cycliques, et temporaires. L'ensemble de ces propriétés permettent de représenter un type spécifique de perturbation.

Les systèmes multi-agents sont utilisés dans ce travail comme outil de recherche pour effectuer des simulations. Ces simulations, sont utilisées comme méthodologie de recherche afin de tester les différents scénarios. Cela suppose que les phénomènes qu'on observe à l'échelle globale sont une agrégation de choix individuels face à l'environnement. En cela il est possible de parler de modélisation « constructiviste » à savoir un système qui se construit et évolue à partir de la rationalité et la connaissance de ses entités.

Les navires sont modélisés sous forme d'agent à savoir que ceux-ci possèdent un comportement propre qui se compose d'un objectif (atteindre une destination), d'une capacité (possibilités de déplacement) et d'un environnement (une accessibilité à l'espace). Le système multi-agent est utilisé afin de modéliser l'interaction entre la structure spatiale de l'environnement maritime et les navires. De ces interactions, un réseau maritime émerge et les propriétés spatiales de ce réseau permettent d'évaluer la vulnérabilité de celui-ci à la structure spatiale.

Plusieurs formalismes sont utilisés pour modéliser un système multi-agents. UML est un langage de modélisation de système généraliste mais souvent utilisé pour la modélisation agent. Cependant des langages de modélisation plus spécifique sont apparus dans les dernières années

comme AUML ou AML. Ce dernier propose des classes (agent, environnement…) spécifiquement dédiées à la conception de systèmes multi-agents. Enfin, le protocole ODD, n'est pas un langage de modélisation mais est très utile comme outil de description et de formalisation des spécificités du modèle.

Plusieurs outils existent pour l'implémentation et la simulation de système multi-agents. Spécifiquement dédié à la recherche, NetLogo est un des outils les plus utilisés pour l'implémentation de modèle multi-agents. Cependant, AnyLogic propose un outil plus complexe et générique (Dynamique des systèmes, modélisation d'événement discret) mais est particulièrement robuste pour la modélisation, l'implémentation et la simulation. Ce dernier a été choisi comme outil dans le cadre de cette recherche.

Chapitre 3 : Proposition d'une démarche de modélisation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime

L'utilisation de modèle en sciences de l'information géographique, et plus généralement en géographie quantitative remonte aux années 60 dans la géographie anglo-saxonne. Un modèle peut ainsi se définir comme « *Une représentation schématique de la réalité, élaborée en vue de comprendre et faire comprendre la réalité* ». (Haggett, 1973). La modélisation apporte ainsi une vision schématique, systémique et simplifiée d'une réalité dite « objective ». Le modèle proposé se base à la fois sur les systèmes multi-agents comme principe de modélisation et sur les objets spatio-temporels, comme entités de cette modélisation. En effet les travaux de Langlois (2010), Mathian et Sanders (2015) permettent de lier une approche agent à une modélisation d'objets spatio-temporels.

3.1 Développement d'un système de simulation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime

L'objectif du modèle est d'évaluer la vulnérabilité du réseau maritime dans le cadre de la planification des espaces maritimes. En effet, les conflits d'usages en mer, les appropriations de l'espace et les événements naturels peuvent avoir un impact sur la performance du réseau. Ainsi, ce modèle sera ensuite utilisé comme système de simulation, afin de quantifier et qualifier ces baisses de performances liées aux modifications de l'espace maritime.

3.1.1 Un outil pour la planification de l'espace maritime

Pour une évaluation des pertes de performances et pour la planification des espaces maritimes, l'outil doit permettre de répondre à des enjeux économiques, stratégiques et sécuritaires pour le développement de l'activité maritime :

- Connaitre l'influence de la structure spatiale maritime sur les ports (vulnérabilité d'accès relative à leurs emplacements) et identifier l'emplacement des ports pour le développement d'activités de transport.
- Connaitre la capacité du réseau (ensemble des navires) à s'adapter à l'espace dans le cadre d'une perturbation et permettre de mettre en évidence les zones vulnérables liées à la structure spatiale (checkpoints) et son usage (zones denses).
- Connaitre l'influence relative de la structure spatiale dans la performance du réseau comparativement aux variations économiques, et démontrer l'influence de la structure de l'espace sur le fonctionnement du réseau.

La simulation, particulièrement les simulations spatiales, permettent de mieux appréhender les problématiques liées aux transports (Miller 1999). Ainsi, pour évaluer la vulnérabilité il est nécessaire de mettre en place un système de simulation, mais également de proposer des indicateurs permettant d'utiliser le système de simulation. Pour cela, la première étape est la conceptualisation et le développement du modèle, la deuxième étape, la mise en place d'indices et indicateurs adaptés afin d'extraire des informations utiles du système de simulation.

3.1.2 Principe du système de simulation

Le principe du système repose sur la méthodologie d'évaluation des réseaux de transports proposée par Gleyze et décrite dans la partie 1 :

Etapes de la méthodologie (Gleyze, 2005)	**Prise en compte dans la modélisation**	**Prise en compte dans la simulation**	**Sortie du système**
Identifier les menaces : avoir la connaissance des aléas susceptibles d'endommager les réseaux de transport	Modélisation de l'espace maritime, du réseau maritime et de perturbations ayant un impact sur le réseau.	Contrôles utilisateur permettant de déclencher des perturbations économiques, spatiales et spatio-temporelles.	Modification des caractéristiques du réseau maritime suite aux scénarios de perturbation.
Connaitre les enjeux : quels sont les éléments vulnérables dans le réseau de transport	Performance et efficacité du réseau de transport maritime face aux modifications de l'espace maritime.	Plus courts chemins, temps de simulation et fonction coût-distance afin de déterminer les pertes d'efficacités spatiales, temporelles et économiques du réseau.	Mesure des déviations spatiales et temporelles du réseau perturbé.
Déterminer ce qui menace les enjeux, et comment les	Mise en place d'indicateurs spécifique pour	Modifications topologiques et géométriques des	Analyse des indicateurs pour l'évaluation de

dommages sont répartis	l'évaluation de la performance du réseau maritime.	liens (routes maritimes) et des nœuds (ports).	performance du réseau maritime.

Ainsi la phase de modélisation peut être découpée en deux étapes : la modélisation du réseau et de l'espace maritime, d'une part, et l'évaluation du réseau maritime d'autre part.

La première étape est de modéliser un réseau dans un espace ouvert, celui-ci doit pouvoir prendre en compte les interactions de l'espace et du réseau afin de pouvoir assurer la deuxième étape, à savoir mettre en place des indicateurs pour mesurer la performance du réseau maritime dans un espace perturbé. Cela suppose alors de faire des choix méthodologiques.

3.1.3 Choix méthodologiques

Le développement du modèle présuppose de faire des choix méthodologiques. En effet, avant de proposer une démarche pour la simulation, certains choix doivent être explicités afin de justifier la conceptualisation et modélisation de la démarche proposée. En effet, proposer une démarche demande de justifier les approches et les paradigmes choisis pour répondre à la question de recherche.

3.1.3.1 Déterminisme et Complexité

Le premier choix méthodologique est celui des systèmes complexes pour modéliser le réseau et évaluer sa vulnérabilité. Les systèmes complexes s'opposent épistémologiquement aux systèmes dits déterministes, à savoir des systèmes prédictibles, dont les résultats en sortie du système sont uniquement la conséquence d'opérations et d'algorithmes. En effet des modèles dits déterministes comme les Monte-Carlo sont parfois utilisés en géographie.

La fiabilité et la vulnérabilité des réseaux de transports sont parfois étudiées à partir de modèle mathématique et linéaire (Giray Resat et Turkay, 2015) où chaque facteur (économique, environnemental, spatial, social) est une variable explicative d'un modèle mathématique optimisant l'efficacité du navire. Cependant, le paradigme complexité n'a pas pour objectif l'optimisation d'un système mais d'expliquer le fonctionnement de celui-ci en le construisant depuis ses plus simples composants, ici les navires et leurs déplacements dans l'espace maritime.

Bousquet, Le Page, et Müller (2002) réactualisent la typologie proposée par Weinberg (1975) des différents types de systèmes pour décrire les cas de figures dans lequels le paradigme multi-

agents s'applique. Ainsi, si le système peut être facilement décrit au travers des lois d'ensemble et générales, des équations différentielles ou des simulations Monte-Carlo suffisent à la modélisation du système. Il s'agit d'un cas de simplicité organisée, pouvant être résolue dans une approche déterministe. Dans le cas d'une simplicité désorganisée, à savoir un grand nombre d'entités en interactions avec un comportement uniforme, une approche complexe et holiste s'applique, et une utilisation des automates cellulaires permet de modéliser le système. Dans le cas d'une complexité organisée, à savoir un nombre d'entités limitées mais aux comportements et rôles différenciés, les systèmes multi-agents peuvent alors être utilisés. En effet, ceux-ci sont adaptés à l'étude de ce type de système et permet d'expliquer certains phénomènes comme les systèmes perturbés, les écosystèmes (modèle proie-prédateur) et permet d'expliquer ces processus de reconfiguration des systèmes ouverts par les interactions des composants du modèle.

3.1.3.2 Système multi-agents et automate cellulaire

Le second choix méthodologique a été le choix des systèmes multi-agents. En effet, deux types de systèmes complexes sont utilisés en sciences de l'information géographique : les systèmes multi-agents et les automates cellulaires. Bien que plus anciens, les automates cellulaires sont toujours très utilisés en modélisation et simulation Langlois (2010), cependant ceux-ci semblaient moins indiqués dans le cadre de cette recherche pour les raisons suivantes :

Contrairement aux systèmes multi-agents, les automates cellulaires ne permettent pas de prendre en compte les décisions individuelles des navires. Les automates cellulaires sont des systèmes globaux, où les caractéristiques et propriétés de chaque partie de l'espace sont agrégées. Ainsi, même s'il est possible de jouer sur des règles de diffusion afin de modéliser un réseau à travers un espace discrétisé, la prise de décision ne peut se faire à un niveau individuel où chaque navire peut alors adopter un comportement (choisir une trajectoire, modifier sa destination…) en fonction des caractéristiques de l'environnement.

Ainsi dans un système complexe, le global se construit consécutivement aux interactions locales, ce qui permet d'obtenir une structure spatiale, ici celle d'un réseau en espace maritime. C'est ainsi l'ensemble des parcours individuels des navires qui va former la structure spatiale du réseau. Plusieurs éléments du modèle poussent à opter pour une utilisation des systèmes multi-agents plutôt qu'une approche déterministe ou complexe par automate cellulaire :

- L'espace maritime étant un espace ouvert, les possibilités de déplacements sont théoriquement infinies. Cela signifie que pour relier deux ports, il est possible de choisir

une infinité de chemins. Par l'objectif individualisé des agents, à savoir la recherche du plus court chemin, le paradigme agent permet de réduire ces possibilités.

- Les navires ont un impact sur le réseau par leurs déplacements dans l'espace maritime. La simulation multi-agents permet ainsi de tester la désorganisation et réorganisation du réseau face à un environnement modifiable. En effet, les perturbations modifient l'environnement spatial qui demande à chaque navire de se réadapter. Le paradigme avant peut ainsi être utilisé pour observer et quantifier les modifications du réseau à l'espace maritime.
- Les possibilités exploratoires de la simulation permettent de tester plusieurs paramètres, les faire évoluer et observer les modifications. En effet, la simulation permet de faire évoluer le réseau, dans de multiples configurations possibles. Cela permet d'évaluer la performance du réseau dans plusieurs configurations spatiales possibles.

3.2 Choix de modélisation

Afin de mettre en place le système, plusieurs choix de modélisation sont effectués afin de pouvoir modéliser, simuler et évaluer la vulnérabilité du réseau maritime. Parmi ceux-ci la modélisation de l'espace, des échanges, des distances doit être effectués.

3.2.1 Choix d'une modélisation de l'espace

Le premier choix de modélisation est le choix d'une structure de l'espace maritime. La modélisation spatiale nécessite de tenir compte de la fonctionnalité d'hypermobilité, à la fois hétérogénéité et dynamique de l'espace, en raison du présent des éléments spatiaux. Ces exigences de modélisation sont liées aux fonctionnalités de l'espace maritime : l'hétérogénéité de l'espace nécessite une entité spatiale divisée et la dynamique de l'espace nécessite une évolution des configurations spatiales. Cette approche correspond à la première et à la troisième approche de modélisation distinguées par Sanders et Ruas (2015).

Compte tenu de ces exigences, plusieurs critères doivent être pris en considération pour le choix d'une modélisation spatiale. Tout d'abord, une propriété spatiale topologique et géométrique est nécessaire pour attribuer un niveau d'accessibilité pour chaque point de l'espace. Les critères topologiques évaluent la capacité de la modélisation spatiale à relier les différentes parties de l'espace. Les critères géométriques évaluent la capacité d'assigner à chaque emplacement dans l'espace maritime une valeur d'accessibilité. Deuxièmement, la modélisation spatiale doit capter les éléments pour mesurer l'accessibilité, leur hétérogénéité et leur dynamique par densité, dynamique temporelle et accessibilité. Les critères de densité sont la capacité de tenir compte

de la densité des éléments dans l'espace, de dynamiser la capacité d'adaptation de la modélisation spatiale à la dynamique des emplacements et des critères évolutifs pour adapter la modélisation spatiale à l'échelle de la densité des emplacements.

Dans le cadre d'une modélisation régulière par carrés, deux distances sont possibles : la distance de Moore et la distance de Van Neumann. Nous avons choisi la distance de Van Neumann, à 4 voisins, afin de préserver des distances similaires entre toutes les parties de l'espace. Cela permet que l'ensemble des déplacements dans l'espace ait la même distance. Cependant, cela a également pour contrainte que plusieurs courts chemins équivalents existent dans l'espace de simulation. Pour cela, les directions Nord/Sud sont prioritaires sur les directions Est/Ouest (Fig.30).

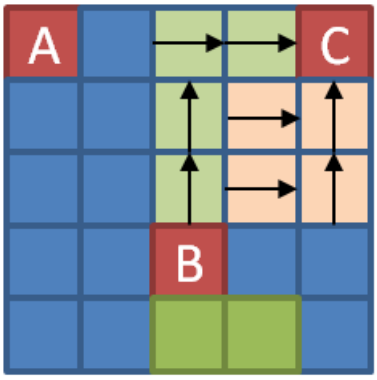


Figure 30. Priorisation des plus courts chemins dans l'espace de simulation

3.2.2 Choix d'une modélisation des échanges

Un voyage de navire est construit à partir d'une origine, d'une trajectoire dans l'espace maritime et d'une destination. Le réseau maritime peut donc être défini topologiquement par les ports, raffineries et plateformes et géométriquement par la longueur spatiale et temporelle des trajectoires effectuées dans l'espace maritime en fonction de l'accessibilité de l'espace. En cela, il s'agit d'un réseau spatial dynamique, pondéré par la distance entre les nœuds. En effet, la longueur des liens évolue en fonction des perturbations perturbant le fonctionnement du réseau maritime.

Pour modéliser les échanges, il est nécessaire d'utiliser un modèle d'interaction spatial. Trois types de modèles peuvent être utilisés : les modèles gravitaires, les modèles de potentiel et les modèles de détails. Ces derniers sont principalement utilisés en économétrie et ne s'appliquent pas dans notre problématique. Le modèle gravitaire est le plus communément utilisé dans les

études portant sur les échanges internationaux (Rodrigue, 2013). Celui-ci est choisi afin de modéliser les échanges.

Il se base sur la localisation des différents lieux d'échanges, la distance existante entre eux, les interactions entre eux (la possibilité d'effectuer un échange), le poids (les volumes à échanger), une constante de pondération permettant de définir le niveau d'événements. Deux paramètres permettent de calibrer les modèles, les « frictions de l'espace » et donc l'accessibilité du territoire au moment de démarrer le voyage et le niveau d'attractivité de chaque point, qui peut être lié à plusieurs facteurs, et dans le cas d'un réseau de transport, lié au volume d'échange.

3.3 Description du système de simulation

Le protocole ODD (*Overview, Design concepts, and Details*) fournit une vision générale du système modélisé, tant du point de vue de sa structure que de sa dynamique. Elle est composée de trois éléments principaux : la vue d'ensemble, la conception et les détails de fonctionnement. Chaque catégorie répond à une étape de conceptualisation du modèle.

3.3.1 Vue d'ensemble

Objectif du modèle

Ce modèle est développé pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime. Pour cela, le modèle prendre en compte les interactions entre le réseau maritime, formalisé à partir des comportements spatiaux individuels des navires et le territoire maritime, support spatial des perturbations, événements ayant une influence sur la performance du réseau. Pour cela, l'environnement de simulation proposé prend en considération plusieurs types de perturbations.

L'espace est composé de cellules régulières, permettant ou non, aux agents de se déplacer. Chaque cellule a des caractéristiques attributaires propres et un voisinage qui correspond aux cellules adjacentes à celles-ci. Le réseau est composé par la localisation des ports et les déplacements des navires. Les ports sont des cellules spécifiques dont la localisation détermine le point de départ et d'arrivée des navires. Le déplacement des navires se matérialise par des trajectoires composées d'une liste de cellule adjacentes.

Les perturbations impactent les parcours des navires. En effet, à chaque déplacement dans l'espace, un calcul est effectué par le navire via une matrice de distance permettant d'indiquer le meilleur voisin de l'espace traversé pour continuer le parcours. Les perturbations étant prises en compte via l'influence qu'elles ont sur la matrice de distance, ce qui permet une matrice corrigée de la friction des distances.

Entités variables d'état et échelle

Plusieurs entités interagissent dans le modèle, et leurs relations sont décrites dans la figure suivante, les classes entre parenthèse sont les classes AML présentés dans la partie précédente :

- **Navires (agents)** : Un navire est un agent qui décrit un comportement spatial en fonction de son objectif, ses capacités et son environnement. Ce comportement spatial est déterminé à travers les matrices de distances calculées à chaque déplacement du navire afin d'atteindre son objectif, le port de destination. Ces matrices de distances permettent aux agents de modifier leurs trajectoires ou le port de destination en fonction de la friction de l'espace lié aux perturbations. Les navires ont une connaissance limitée des distances et des perturbations, ne pouvant pas anticiper les mouvements des perturbations déterminées par l'utilisateur.

Ces agents reposent et se déplacent sur un environnement composé de :

- **Cellules (environnement)** : Une cellule est une partie de l'espace maritime, une unité spatiale utilisée comme support pour les interactions entre les navires et l'environnement. L'ensemble de ces cellules compose l'espace de simulation. Ces cellules se décomposent en plusieurs catégories ayant des attributions spécifiques dans l'espace de simulation :
  - **Ports (environnement)** : Les ports sont les lieux d'entrée et de sortie de l'espace maritime et du voyage. Ce sont des cellules spécifiques.
  - **Cellules maritimes** : Les cellules « maritimes » sont des cellules navigables pour les navires. Ces cellules sont utilisées par la matrice des distances afin de calculer les trajectoires des navires.
  - **Cellules terrestres** : Les cellules « terrestres » sont des cellules pour lesquelles la navigation est impossible. Ces cellules ne sont pas prises en compte dans la matrice de distance.
  - **Cellules perturbées** : Cellule d'espace maritime modifié par l'utilisateur, ayant une accessibilité nulle. Ces cellules sont des cellules « maritimes » spécifiques ayant un niveau de « friction » réduisant l'accessibilité des navires.

Cet environnement peut être modifié, par l'utilisateur de la simulation via des perturbations :

- **Perturbations (ressource)** : Une perturbation est une entité ayant une influence sur les trajectoires des navires. Les perturbations peuvent être de différentes natures :

- **Perturbations économiques :** Les perturbations économiques sont une variation du volume d'offre ou de demande général, influant sur le nombre de voyages à créer pour l'approvisionnement entre les ports.
- **Perturbations spatiales** : Une perturbation spatiale est l'ajout ou la suppression d'une barrière dans l'espace maritime.
- **Perturbations spatio-temporelles :** Une perturbation spatio-temporelle est l'ajout d'une barrière dynamique dans l'espace de simulation, qui évolue pendant ou avant le transport.

Certaines entités sont des agrégats d'autres composants :

- **Route (organisation)** : Les routes sont une agrégation de voyages effectuées entre deux ports. Celles-ci regroupent les informations relatives aux déplacements des navires dans l'espace maritime et aux volumes d'offre et de demande échangés.
- **Réseau (organisation)** : Le réseau correspond à la moyenne de l'ensemble des voyages réalisés par les agents et permet d'agréger l'ensemble des informations propres au transport maritime (vitesse, distance, temps, volume transporté). Le réseau est ainsi un objet qui se construit durant la simulation en fonction des déplacements des navires.

Processus et ordonnancement

L'objectif de cette partie est de décrire l'état initial du système ainsi que l'ensemble du processus de simulation. Celui-ci peut être décrit en 3 étapes : l'initialisation, qui nécessite les données d'entrée de la simulation, l'ordonnancement, qui correspond à l'ensemble des étapes du traitement de l'information, et les résultats de simulation, à savoir les données traitées par le système de simulation.

- **Initialisation :** Le processus d'initialisation a pour but de générer un espace de simulation :
  - **Création des cellules** : L'utilisateur choisit de générer une grille représentant l'espace maritime. Cet espace est défini par l'utilisateur à travers des paramètres (% de cellules maritimes, hauteur et longueur de la grille, dimension de la cellule). Et permet de générer un espace maritime aléatoire.
  - **Création des ports** : En fonction du nombre de ports sélectionnés par l'utilisateur, chaque port se voit attribuer un volume aléatoire d'offre et de demande (volume qui peut être à la fois réduit ou augmenté par l'utilisateur).

Une fois ces variables mises en place (disposition de l'espace et des volumes à transporter). L'ordonnancement de la simulation peut démarrer.

- **Ordonnancement :** L'ordonnancement correspond aux étapes de traitement des informations durant la simulation. 4 étapes principales peuvent être distinguées et explicitées dans cette partie :

  • **Modèle gravitaire** : La première étape consiste à déterminer l'ensemble des voyages à effectuer, l'origine et la destination du voyage, les quantités à transporter dans chaque voyage en fonction de la capacité des navires.

  • **Simulation des voyages dans l'espace :** La seconde étape est de simuler les voyages dans l'espace maritime en fonction de la destination à rejoindre. Chaque parcours est calculé en amont afin de rejoindre de manière la plus efficace (en temps et espace) le port de destination.

  • **Simulation d'un ou plusieurs objets de perturbations** : Ajout dans l'espace de perturbations. La localisation et l'influence de celles-ci peuvent être choisies par l'utilisateur. Cela permet de modifier les déplacements des navires qui s'adaptent à la nouvelle configuration spatiale.

  • **Analyse des indicateurs :** L'ensemble des indicateurs permettent d'analyser les résultats du graphe et d'évaluer la vulnérabilité du réseau maritime aux perturbations définies par l'utilisateur.

3.3.2 Conception et design du modèle

Cette partie décrit les différents choix de conception du modèle, ses caractéristiques en tant que système complexe et ses spécificités.

Principe de base

Le modèle a pour but d'observer les variations des propriétés spatiales du réseau (topologie, géométrie, relationnels) avant, pendant et après les différents scénarios de perturbations. Ces émergences dépendent du comportement spatial des navires pour atteindre leurs destinations.

Emergence

La notion d'émergence est appréhendée dans le modèle à travers les différentes configurations du réseau en cas de perturbation. En effet, les modifications des trajectoires des navires, dynamiquement recalculées en cas de perturbation, impactent les propriétés géométriques et

topologiques du réseau. Ainsi le but est d'observer la structure de réseau et comment émerge une nouvelle structure de réseau suite à une perturbation.

Perception

Nous partons du principe que les navires possèdent toutes les informations nécessaires pour le calcul de leurs trajectoires (ayant des systèmes de navigations en temps-réel fonctionnels). Si l'espace utilisé pour la trajectoire est affecté par une perturbation, alors la trajectoire est recalculée à partir de la position du navire à l'instant de la modification de l'espace.

Interaction

La seule interaction prévue est l'interaction entre les navires et les perturbations. Celle-ci modifie l'environnement des navires qui se doivent alors de s'adapter à la nouvelle configuration du territoire. Cette interaction est prise en compte à travers la matrice des distances de chaque navire en fonction de la présence de perturbation.

Stochasticité

Les données d'entrées, à savoir la structure de l'espace et les volumes échangés sont générés aléatoirement, cependant ils peuvent être modifiés par l'utilisateur au cours de la simulation.

Observation

En prenant en compte l'ensemble des voyages effectués entre deux ports, il est possible d'enregistrer le temps, les distances et les volumes transportés entre chaque port, cela permet de reconstituer un réseau maritime, s'adaptant aux différentes perturbations dans l'espace maritime. Les variations obtenues sur le réseau au cours du temps permettront d'évaluer la vulnérabilité du réseau par les pertes de performances liées aux perturbations.

3.3.3 Détails de fonctionnement

Initialisation

A l'initialisation, un espace est généré aléatoirement. A chaque port est attribué un volume d'offre et de demande. Le modèle gravitaire est ensuite utilisé pour déterminer les voyages à effectuer. Ces voyages créent alors les agents « navires » qui doivent atteindre un port de destination avec le volume transporté.

Données d'entrée

Le modèle prend en considération un espace, subdivisé en cellules régulières. Ces cellules sont aléatoirement, des ports, des cellules terrestres ou maritimes en fonction des paramètres

déterminés en entrée par l'utilisateur. Les volumes d'offre et de demande associés à chaque port sont aléatoirement déterminés est modifiable à posteriori par l'utilisateur.

3.4 Formalisation du système de simulation

Cette partie a pour but de fournir une formalisation du modèle, avec les principes de modélisation de l'AML afin de décrire les classes et les processus du modèle réalisé.

3.4.1 Modélisation générale du système de simulation

Le système de simulation est composé de différentes classes interagissant entre elles. Dans la formalisation proposée, la cardinalité des relations ainsi que les classes sont exprimées en AML, lui-même reprenant les principes de formalisation de l'UML (Fig. 31) :

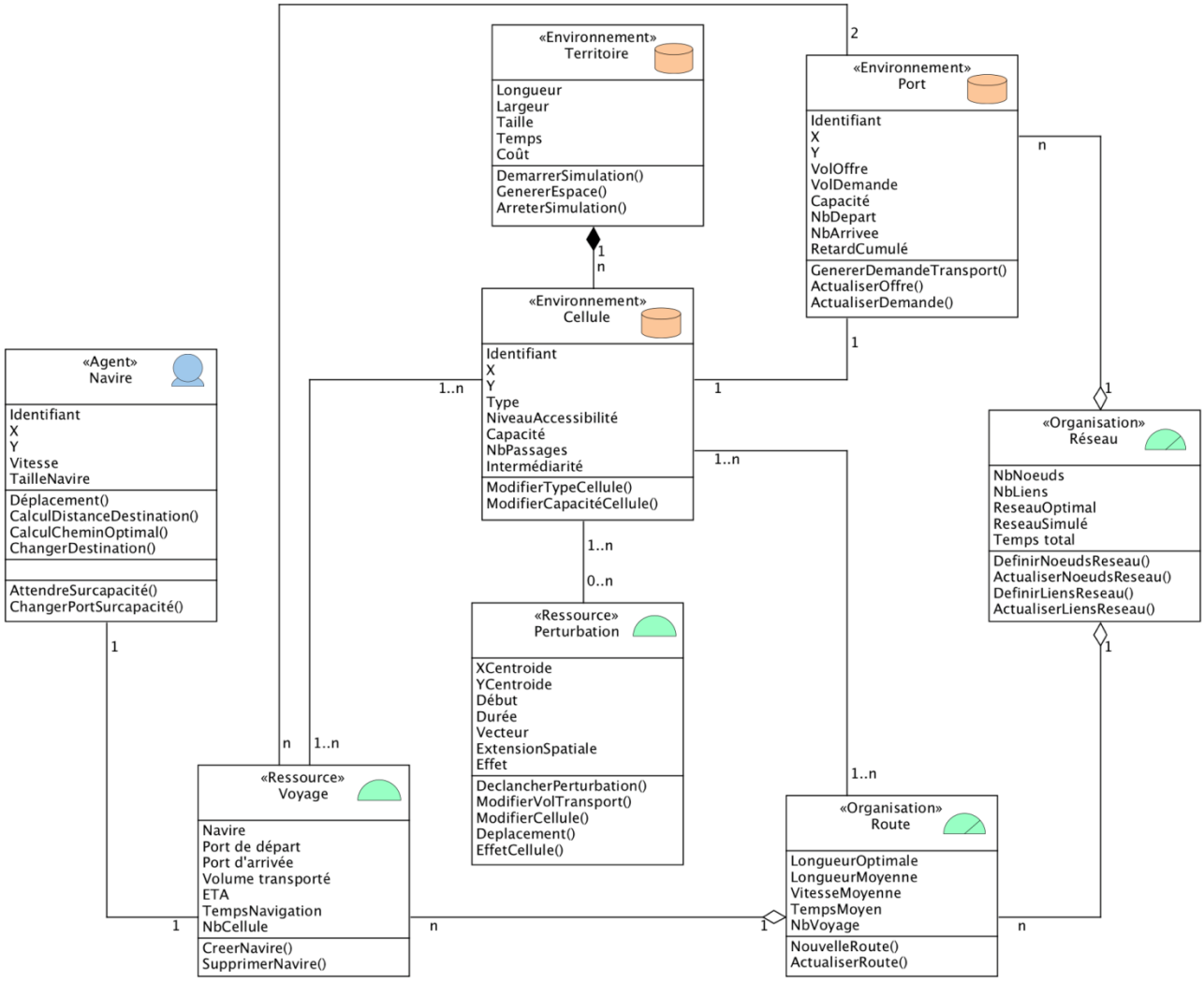


Figure 31. Diagramme de classe du système de simulation

3.4.2 Modélisation des données

Cette partie décrit les différentes classes du modèle ainsi que les variables et fonctions liées à chaque classe. Ces classes permettent de modéliser les différents éléments du modèle décrit auparavant : l'espace maritime, les navires et les déplacements, les perturbations et le réseau maritime.

3.4.2.1 Modélisation des classes du territoire maritime

Le territoire de l'espace maritime est modélisé par deux classes de type « environnement ». La classe territoire correspond à l'ensemble de l'espace de simulation (Fig. 32). Cet espace est décomposé en cellules carrées et régulières formant une grille dans laquelle les différents agents et objets évoluent.

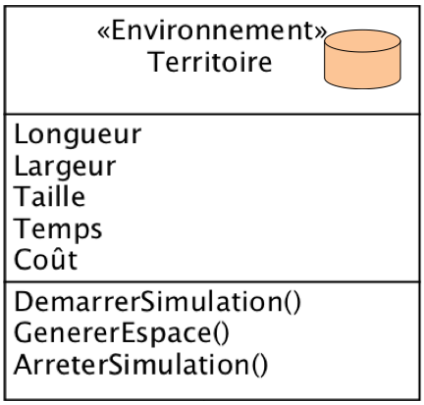


Figure 32. Classe "Territoire" du modèle

La classe territoire possède plusieurs variables, toutes étant déterminées par l'utilisateur :

Longueur : Longueur de la grille exprimée en nombre de cellules

Largeur : Largeur de la grille exprimée en nombre de cellules

Taille : Dimension des cellules

Temps : Temps de simulation (temps continu)

Coût : Facteur de coût en fonction de la distance

Deux fonctions sont associées à la classe :

DémarrerSimulation() : Permet la division des cellules, la spécification des types de cellules (mer, terre, port) afin de débuter la simulation

GenererEspace() : Permet d'initialiser la création de l'espace de simulation.

ArreterSimulation() : Permet d'arrêter le temps de simulation et visualiser les résultats de simulation révélés par les indicateurs.

La cellule est l'unité spatiale de l'environnement de simulation (Fig. 33). Il s'agit d'un espace carré possédant 4 voisins pour chaque côté de la cellule, en fonction de la distance de Van Neumann.

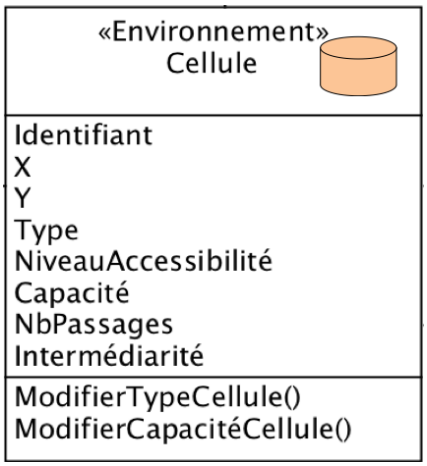


Figure 33. Classe "Cellule" du modèle

La classe Cellule a pour variables et fonctions :

Identifiant : Identifiant de la cellule

X : Position horizontale de la cellule dans l'espace de simulation

Y : Position verticale de la cellule dans l'espace de simulation

Type : Type de la cellule. Celle-ci peut être, au moment de l'initialisation maritime, terrestre ou portuaire.

NiveauAccessibilité : Niveau d'accessibilité de la cellule.

Capacité : Nombre maximum de navires pouvant utiliser l'espace de la cellule pour la navigation

NbPassages : Nombre de passages ayant transités dans la cellule

Intermédiarité : Nombre de plus court chemin transitant par la cellule

ModifierTypeCellule() : Cela permet de modifier les caractéristiques de la cellule (ports, cellules terrestres, maritimes ou perturbées) en fonction des choix de l'utilisateur.

ModifierCapacitéCellule() : Modifie la variable capacité de la cellule

3.4.2.2 Modélisation du transport et des navires

La modélisation des navires et des déplacements est gérée par 3 classes : les navires, les voyages et les trajectoires. Les navires sont des agents générés pour chaque voyage. Ces voyages sont générés par le modèle gravitaire en fonction du niveau d'offre et de demande des ports). La

classe voyage contient les informations statiques liées aux voyages, alors que la classe Navire les données relatives au mouvement. Un navire est une entité qui va se déplacer dans l'environnement par des trajectoires mesurées dynamiquement en fonction des attributs des cellules traversées.

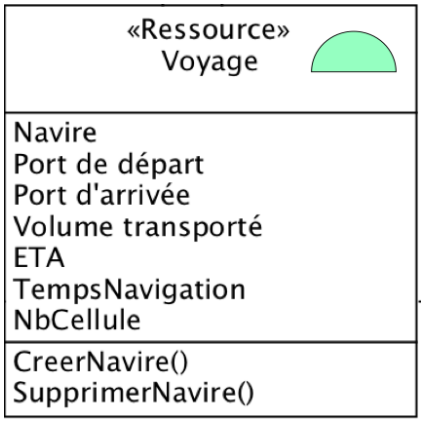


Figure 34. Classe "Voyage" du modèle

La classe voyage (Fig. 34 a pour variables :

Navire : Identifiant du navire effectuant le voyage

Port de départ : Identifiant du port de départ du voyage

Port d'arrivée : Identifiant du port d'arrivée du voyage

Volume transporté : Volume de marchandise transporté par le navire

ETA : Temps d'arrivée estimé du navire au départ du voyage

Temps de navigation : Temps total du navire réalisé à son arrivée dans l'espace de simulation

NbCellule : Nombre de cellules traversées pour réaliser le voyage

CreerNavire() : Ajouter un navire dans l'espace de simulation dans le port d'origine du voyage

SupprimerNavire() : Supprimer le navire une fois la destination du navire atteinte et report d'information à la route maritime.

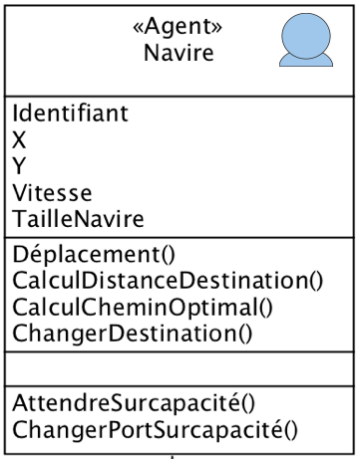


Figure 35. Classe "Navire" du modèle

La classe navire (Fig. 35) correspond aux informations cinétiques du voyage, la position, la vitesse et la taille du navire.

Identifiant : Identifiant du navire.

X : Position horizontale du navire dans l'espace de simulation

Y : Position verticale du navire dans l'espace de simulation

Port de départ : Identifiant du port de départ du voyage

Port d'arrivée : Identifiant du port d'arrivée du voyage

Vitesse : Nombre de pas de temps nécessaire au navire pour se déplacer d'une cellule à une autre.

Déplacement() : Permet à un navire de se déplacer d'une cellule à un de ses 4 voisins.

CalculDistanceDestination() : Calcule la distance du navire avec sa destination

CalculerCheminOptimal() : Calcule le plus court chemin de sa position actuelle au port de destination avec l'algorithme Djisktra.

ChangerDestination() : Modifie la destination du navire durant son déplacement dans l'espace de simulation.

AttendreSurcapacité() : En cas de surcapacité d'un port ou d'une cellule, attendre que celle-ci se libère pour y accéder.

ChangerPortSurcapacité() : En cas de surcapacité d'un port, choisir le port le plus proche du navire comme port de destination.

3.4.2.3 Modélisation des perturbations

Comme décrit précédemment, plusieurs types de perturbations ont été conceptualisés pour le système de simulation : les perturbations économiques, les perturbations spatiales et les perturbations spatio-temporelles. La classe perturbation est relative aux perturbations spatiales et spatio-temporelles. En effet les perturbations économiques n'ont pas besoin d'une classe spécifique, elles sont modélisées à partir de modification des attributs des ports (volume d'offre et volume de demande).

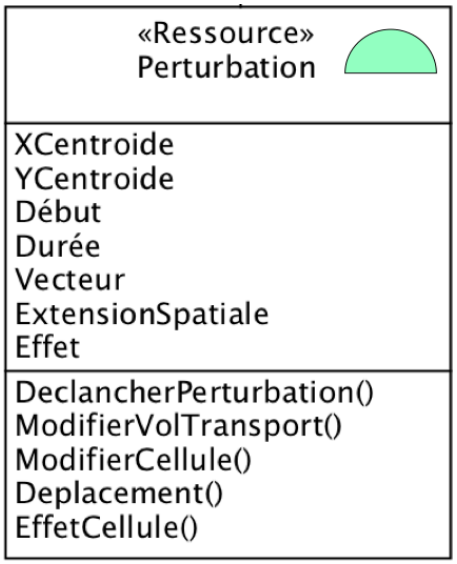


Figure 36. Classe "Perturbation" du modèle

Les perturbations (Fig. 36) sont des objets dynamiques modifiant les caractéristiques de l'espace maritime caractérisées par les variables suivantes :

X Centroide : Position horizontale de la cellule centrale de la perturbation dans l'espace de simulation

Y Centroide : Position verticale de la cellule centrale de la perturbation dans l'espace de simulation

Début : Début de la perturbation durant le temps de simulation

Durée : Durée totale de la perturbation dans l'espace de simulation

Vecteur : Direction de la perturbation dans l'espace de simulation parmi les 4 points cardinaux (Nord, Sud, Est, Ouest)

Extension spatiale : Extension de la perturbation exprimée en nombre de cellules perturbées depuis le centre de la perturbation

Effet : Malus de distance sur les cellules perturbées impactant les chemins optimaux des navires.

DéclancherPerturbation() : Création de la perturbation en fonction des paramètres définis par l'utilisateur.

ModifierVolTransport() : Modification du volume d'offre ou de demande des ports.

ModifierCellule() : Modification des propriétés d'une cellule donnée.

Deplacement() : Déplacement de la perturbation dans l'espace de simulation.

EffetCellule() : Modification de l'accessibilité des cellules perturbées.

3.4.2.4 Modélisation du réseau maritime

Le réseau maritime correspond dans le modèle, à un réseau spatial, les ports étant modélisés comme nœuds, les routes maritimes les reliant comme liens. Les pondérations des ports comme des liens sont effectuées à partir de l'agrégation des voyages effectués dans l'espace de simulation et à partir des données spatiales et temporelles. Les ports sont modélisés par des cellules, ainsi un port correspond à une unité spatiale dans l'espace de simulation.

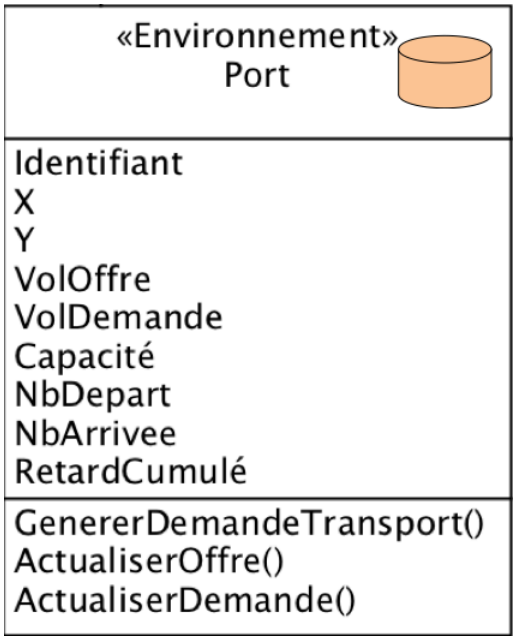


Figure 37. Classe "Port" du modèle

Les ports (Fig. 37) ont pour variables :

Identifiant : Identifiant du port.

X : Position horizontale du port dans l'espace de simulation.

Y : Position verticale du port dans l'espace de simulation.

Volume d'offre : Volume disponible pour le transport stocké dans le port.

Volume de demande : Besoins de marchandises du port.

Capacité : Nombre de navires pouvant rester à l'intérieur du port

NbDepart : Nombre total de navires étant partis du port.

NbArrivée : Nombre total de navires arrivés dans le port.

RetardCumulé : Temps (en temps de simulation) de retard accumulé dans le port comme destination.

GenererDemandeTransport() : Activer le modèle gravitaire permettant de déduire le volume de marchandises à transporter entre les paires de nœuds.

ActualiserOffre() : Une fois un port arrivé à destination, le volume transporté est ajouté au volume total du port

ActualiserDemande() : Une fois un port arrivé à destination, le volume transporté est déduit au volume total du port

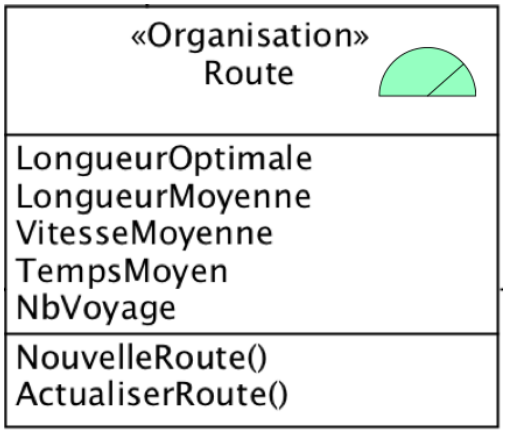


Figure 38. Classe "Route" du modèle

Une route est une agrégation de l'ensemble de voyages étant effectués dans l'espace de simulation entre deux ports (Fig. 38). Avec les ports, les routes sont une des deux constituantes du réseau. Ce sont les liens du réseau. Une route a pour variables et fonctions :

LongueurOptimale : Distance minimale en cellules d'une route entre deux ports

LongueurMoyenne : Distance moyenne en cellules de l'ensemble des voyages effectués entre deux ports

VitesseMoyenne : Vitesse moyenne des navires sur une route maritime.

TempsMoyen : Durée moyenne de temps de simulation de l'ensemble des voyages effectués entre deux ports.

NbVoyage: Nombre de voyages effectués sur la route maritime

NouvelleRoute() : Lorsque que le premier voyage est créé, ou qu'un nouveau port est ajouté, une route est ajoutée

ActualiserRoute() : Quand un voyage se termine, les informations de celui-ci sont transmises à la route et actualisées.

Enfin, le réseau est un objet de type organisation (Fig. 39), qui correspond à l'agrégation des ports et des routes. Il a pour variables et fonctions :

Nombre nœuds : Total des ports dans l'espace de simulation
Nombre liens : Total des routes dans l'espace de simulation
ReseauOptimal : Longueur totale de l'ensemble de routes formées par les chemins optimaux.
ReseauSimulé: Longueur de l'ensemble des routes du réseau.
Temps total : Temps mis par l'ensemble des navires à traverser le réseau
DefinirNoeudsReseau() : Ajouter un port au réseau
ActualiserNoeudsReseau() : Actualiser les informations liées au port dans le réseau
DefinirLiensReseau() : Ajouter une route maritime au réseau
ActualiserLiensReseau() : Actualiser les informations liées aux routes maritimes dans le réseau.

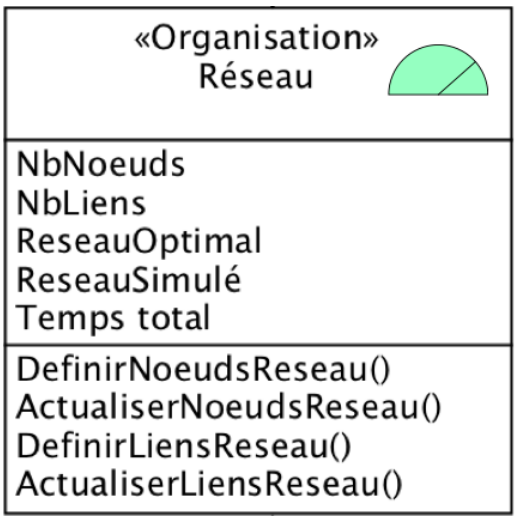


Figure 39. Classe "Réseau" du modèle

3.4.3 Modélisation du processus de simulation

Un diagramme de séquence (UML) est ici utilisé afin de formaliser le système de simulation. Cette partie a pour but de décrire formellement le fonctionnement du système et d'y décrire les processus et les interactions entre les différentes classes.

3.4.3.1 Fonctionnement et processus du système

L'ensemble des opérations décrites ci-dessous sont ensuite représentées dans un diagramme de séquence (Fig. 40) :

DémarrerSimulation() : L'utilisateur démarre le système, pour cela il utilise une interface permettant de lancer la simulation et de définir les paramètres de simulation. Ces paramètres ne peuvent pas être modifiés une fois la simulation démarrée. Les paramètres déterminés par l'utilisateur sont : la longueur et la largeur de la grille en nombre de cellules, le pourcentage de cellules maritimes dans la grille, le nombre de ports, la dimension des cellules, la capacité des ports, la capacité des cellules maritimes et le coût.

GenererEspace() : Cette action permet de générer une grille en fonction des paramètres choisis par l'utilisateur. Cette grille détermine les emplacements des cellules maritimes, des cellules terrestres et des cellules ports, en suivant des règles de cohérence territoriale. La première est que les cellules ports sont obligatoirement en position d'interface et doivent avoir obligatoirement au moins une cellule maritime comme voisin. Deuxièmement, l'espace maritime se doit d'être connexe, ainsi les cellules maritimes ne peuvent pas être disjointes. Ces deux règles permettent de générer aléatoirement des espaces maritimes cohérents pour la simulation.

DefinirNoeudsGraphe() : A partir des positions des cellules ports, les nœuds des réseaux sont définis par les ports. Dans la mesure où il s'agit d'un graphe spatial, l'emplacement et donc la distance entre eux est également enregistrée. Ces ports sont ensuite pondérés par un volume d'offre et un volume de demande de biens.

GenererDemandeTransport() : Une fois les emplacements des ports déterminés, le modèle gravitaire calcule les voyages à effectuer, en fonction des volumes d'offre et de demande des ports ainsi que leurs positions respectives dans l'espace de simulation. Les valeurs obtenues permettent de calculer les volumes à échanger entre un port de départ et un port de destination.

CreerNavire() : En fonction du volume à échanger entre deux ports, plusieurs entités « navires » sont créées afin de réaliser le déplacement dans l'espace. Ces navires transportent une quantité déterminée de marchandises. Chaque navire est créé dans la cellule du port d'origine avec un volume à transporter et une destination à atteindre. Une fois le navire créé il peut ainsi démarrer le voyage.

CalculCheminOptimal() : Le navire calcule la distance optimale entre la position du port de départ et la position du port de destination. Une fois mesurée, la distance est retournée vers la route.

NouvelleRoute() : Une fois le voyage créé et la distance optimale mesurée, une route est à son tour créée afin d'agréger l'ensemble des voyages réalisés entre deux ports.

CalculDistanceDestination() : Une fois la distance minimale entre la destination et la position du navire connue, le navire utilise l'algorithme de Djisktra afin de mesurer la distance la plus courte pour parvenir à sa destination. Une trajectoire entre le navire et la destination est alors créée. Il calcule également l'ETA en fonction de sa vitesse lors de son premier déplacement.

DéfinirLienRéseau() : La route est utilisée pour relier les différents ports et constituer les liens du réseau. Ces liens correspondent topologiquement à la relation entre le port de départ et le port de destination et géométriquement à la longueur de la trajectoire obtenue par l'utilisation de l'algorithme de Djisktra.

Déplacement() : Le navire se déplace d'une cellule sur la trajectoire et se rapproche d'une unité spatiale de sa destination. Ensuite, une condition est appliquée, si la destination n'est pas atteinte, le navire recalcule le chemin optimal, afin de vérifier si des modifications spatiales ont eu lieu sur la trajectoire. Si la destination est atteinte, le navire cesse de se déplacer.

ActualiserRoute() : Actualisation et agrégation de la route suite à un voyage.

ActualiserLienRéseau() : Les déplacements terminés, les informations relatives au voyage (longueur de la trajectoire, temps de voyage) sont stockées dans le réseau et dynamiquement actualisées à chaque arrivée de navire.

SupprimerNavire() : Le navire est supprimé de l'espace de simulation.

ActualiserDemande() / ActualiserOffre() : Une fois les nouveaux volumes obtenus, un nouveau modèle gravitaire est généré afin de déterminer les prochains déplacements dans l'espace de simulation.

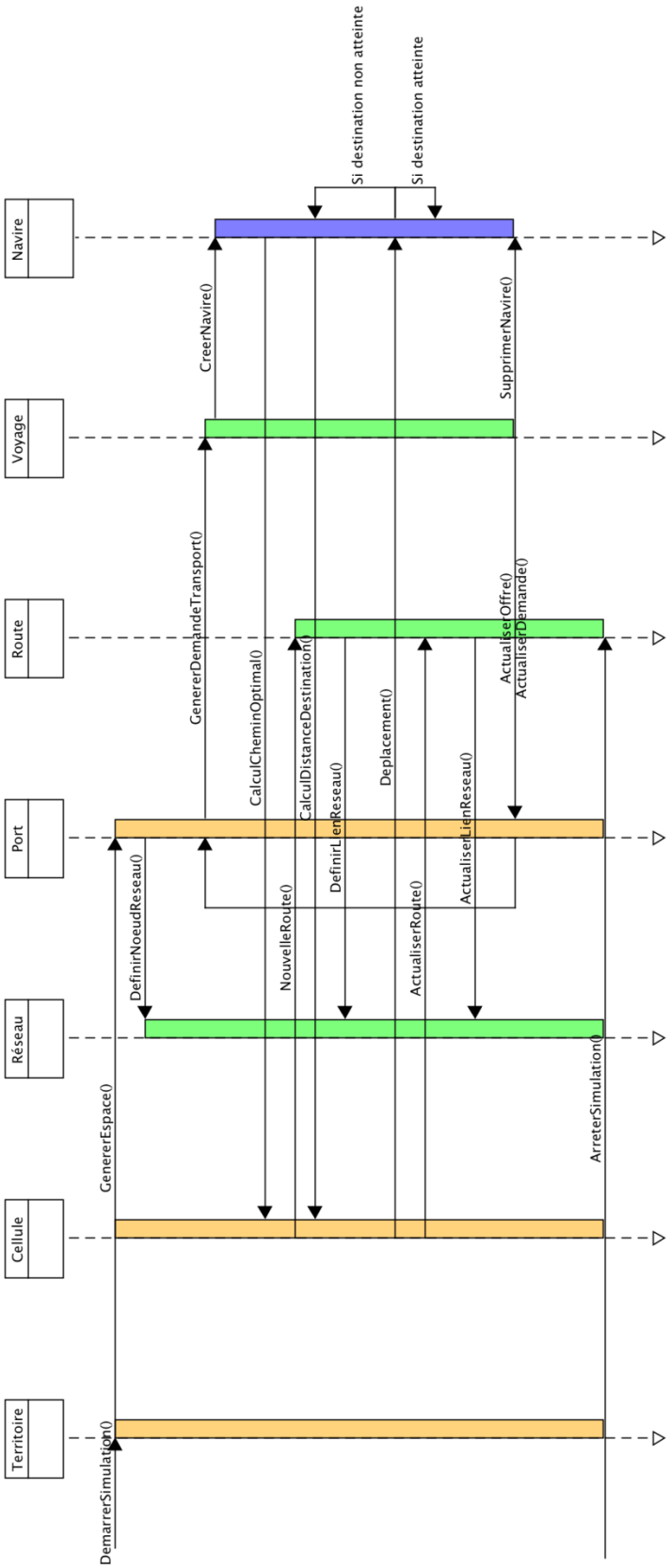


Figure 40. Diagramme de séquence du fonctionnement du système de simulation sans perturbation

3.4.3.2 Fonctionnement et processus des perturbations

L'utilisateur peut modifier l'espace de simulation en y ajoutant plusieurs types de perturbations ayant une influence sur le déroulement de la simulation : il s'agit des perturbations économiques, spatiales et spatio-temporelles (Fig. 41).

DéclencherPerturbation() : L'utilisateur peut déclencher des perturbations dans l'espace de simulation. Pour cela il est nécessaire de spécifier la localisation pour les perturbations spatiales et spatio-temporelles, auquel il faut ajouter le vecteur (Nord, Sud, Est, Ouest), la vitesse de déplacement et la taille de l'objet pour ces dernières. L'utilisateur peut également déclencher des perturbations économiques durant le temps de simulation en modifiant les volumes générés pour chaque port. Ces perturbations permettent de modéliser les évènements ayant une influence sur le volume des ports comme les grèves, les variations économiques et géopolitiques. Pour cela l'utilisateur dispose d'une barre déroulante permettant de générer un volume (de 0 à 100) pour l'offre comme pour la demande.

ModifierVolumeTransport() : Une fois la simulation enclenchée, une limite supérieure est fixée par l'utilisateur, ne générant des volumes compris entre 1 et la limite fixée. Ces volumes sont pris en compte avant la procédure **GenererDemandeTransport()** ce qui permet de prendre en compte la limite supérieure dans le modèle gravitaire, et donc de modifier les voyages à effectuer entre chaque paire de ports.

ModifierCellule() : L'utilisateur peut également déclencher des perturbations spatiales, à savoir une barrière qui va modifier une cellule et la configuration de l'espace de simulation. Pour cela, il peut contrôler directement avec un clic droit de la souris qui permet de modifier une cellule maritime en une cellule perturbée. Une cellule perturbée a les mêmes propriétés qu'une cellule terrestre à savoir qu'elles ne sont pas franchissables et donc non prises en compte dans le calcul des distances.

EffetCellule() : En actionnant la perturbation, une cellule devient inaccessible, l'utilisateur pouvant générer autant de perturbations spatiales. Une fois la cellule inaccessible, celle-ci ne sera pas prise en compte pendant le calcul dynamique des trajectoires des navires, ainsi, si une cellule est placée sur une trajectoire de navire, celui-ci modifiera sa trajectoire afin d'atteindre le port de destination.

ActualiserNoeudsReseau() : Dans le cas où la cellule modifiée est un port, celui-ci est ajouté et/ou supprimé du réseau. Un niveau d'offre et de demande lui est alors attribué.

Déplacement() : La dynamique de l'objet est rendue effective par son vecteur et sa vitesse. Ainsi, à chaque pas de temps, l'objet se déplace en direction de son vecteur. Le déplacement crée de nouvelles cellules impactées et les cellules libérées par les déplacements retrouvent leurs propriétés initiales. Si le bord de l'espace de simulation est atteint, le déplacement est suspendu et l'objet supprimé. Si celui-ci ne l'a pas atteint, alors le déplacement se poursuit.

ChangerDestination() : Dans le cas où un port est supprimé ou fermé pendant qu'un navire tente de le rejoindre, celui-ci prend alors la direction du port le plus proche par rapport à la position actuelle du navire.

SupprimerPerturbation(): Afin de supprimer la perturbation, toutes les cellules sont retransformées en cellules maritimes. Celles-ci retrouvent leurs propriétés initiales et seront réintégrées à l'espace de simulation et au calcul des distances.

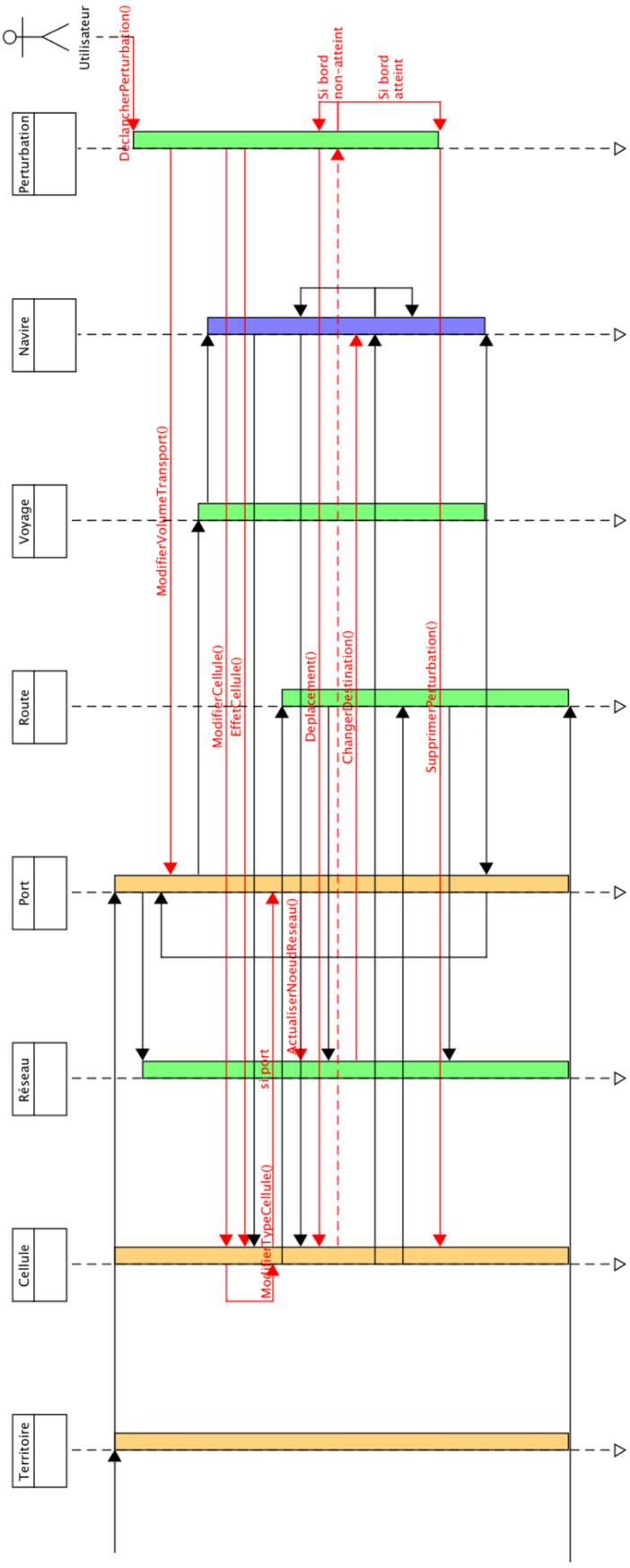


Figure 41. Diagramme de séquence du fonctionnement du système de simulation avec perturbation

3.5 Indicateurs de performance du système de simulation

Le système de simulation permet d'évaluer les pertes de performances du réseau maritime face aux perturbations. Cette évaluation est effectuée au travers les différents indicateurs présentés dans cette partie.

3.5.1 La nécessité d'indicateurs spécifiques

La caractérisation des réseaux pour en déduire sa performance tant que médiateur spatial se fait à travers différents indicateurs. Ducruet et Lugo (2013) prenant en considération les propriétés topologiques, géométriques et relationnelles des graphes ainsi qu'aux matrices associées. Ces mesures comme décrit dans la partie 2, sont liées au degré, à l'intermédiarité, à l'excentricité et au clustering (ou regroupement).

Cependant, ces indicateurs ne peuvent pas nécessairement être utilisés de la même façon du fait des spécificités de la modélisation de l'espace choisie. En effet, afin de prendre en compte un médiateur spatial surfacique, avec un degré de liberté théoriquement infini, une grille carrée a été choisie pour la modélisation de l'espace. Ceci signifie que le réseau obtenu par cette modélisation par discrétisation de l'espace est un espace topologique carré, dans lequel chaque nœud a le même nombre de voisins à une distance similaire.

Cette structuration de l'espace, régulière et généralisable, nécessite des indicateurs spécifiques. En effet, du fait de sa régularité, les indicateurs liés au degré ou au clustering ne peuvent pas s'appliquer dans le cadre de cette recherche. Ainsi des indicateurs spécifiques sont mis en place. Ces indicateurs peuvent s'appliquer aux cellules, aux routes et au réseau global obtenu lors de la simulation.

3.5.2 Indicateurs liés à l'accessibilité à l'espace

Plusieurs indicateurs ont été mis en place afin de mesurer la vulnérabilité liée à l'accessibilité en mer et l'accessibilité aux ports. Ces indicateurs sont illustrés à travers l'exemple d'une simulation de 10 voyages sur un réseau de 3 ports et 3 liens, 6 de ces voyages sont effectués dans un espace non perturbé, et 4 dans un espace perturbé, à chaque fois avec une perturbation différente.

Indice 1. Intermédiarité des cellules

Objectif

L'objectif de cet indicateur est de mesurer, pour chaque cellule, le nombre de plus courts chemins transitant par la cellule (Fig. 42). Cela permet de mettre en évidence les cellules les plus susceptibles d'être utilisées pour le transport et donc les cellules dont l'influence des perturbations sur le réseau est donc les plus importants.

Formule

Pour chaque cellule maritime : **I1** = Nombre de plus court chemin entre deux ports transitant par la cellule

Exemple

Dans l'exemple simple ci-dessus, les 3 ports sont reliés par 3 liens. L'ensemble des chemins utilisent 5 cellules. 4 d'entre elles sont utilisées par deux chemin optimaux, et une d'entre elles par l'ensemble des chemins (AB,AC,BC) qui lui confère la valeur d'intermédiarité maximale possible, à savoir 3.

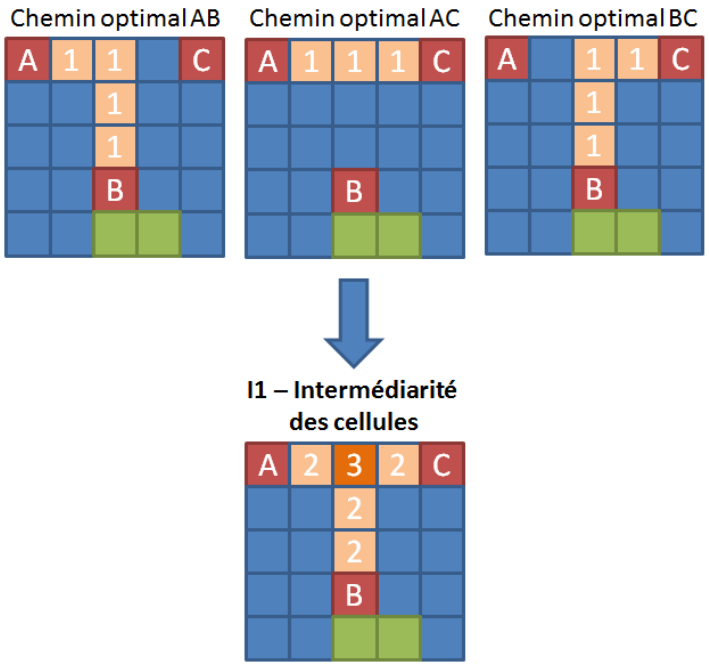


Figure 42. Indice 1 - Intermédiarité des cellules

Indice 2. Matrice des voyages

Objectif

L'objectif de la matrice des voyages est de mesurer pour chaque cellule le nombre de navires ayant transités sur la cellule (Fig.43). Cela permet d'obtenir la répartition totale des voyages effectués dans l'espace de simulation. La matrice des voyages est obtenue pendant la simulation, à chaque passage d'un navire sur une cellule celui-ci est comptabilisé afin d'obtenir le nombre de passage de navire sur la cellule.

Formule

Pour chaque cellule maritime : I2 = Nombre de voyage ayant utilisé la cellule

Exemple

Pour une simulation de 10 voyages, respectivement 4 voyages entre AC et 3 voyages entre AB et BC, afin de respecter la distribution des voyages liés à la distance du modèle gravitaire. Pour l'exemple, 6 de ces voyages sont dans un espace non-perturbé et 4 dans un espace perturbé. Une matrice des voyages est obtenue en agrégeant le nombre de passage de navire par cellule. Cela donne en résultat une matrice de l'ensemble des voyages.

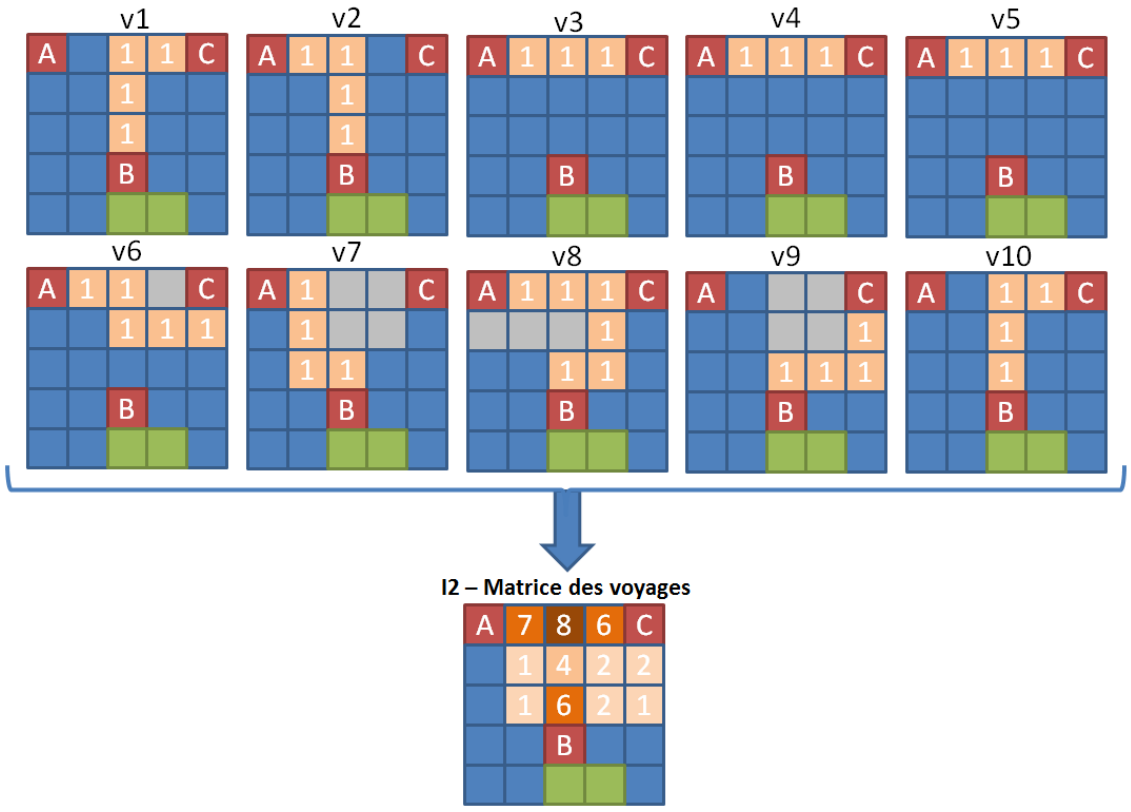


Figure 43. Indice 2 - Matrice des voyages

Indice 3. Performance d'une route maritime

Objectif

Cet indice est obtenu par le rapport entre l'ensemble des cellules utilisées en simulation sur le nombre de cellules du chemin optimal entre deux ports (Fig. 44). Cela permet d'obtenir le nombre de cellule moyen utilisé pour relier deux ports entre eux. Si celui-ci est égal à 1, cela signifie que les perturbations n'ont eu aucune influence sur la route maritime, et s'il est supérieur cela signifie que la perturbation a eu un impact.

Formule

Pour chaque route maritime :

I3 = Nombre de cellules utilisées pour les voyages entre deux ports / (Nombre de voyages * Nombre de cellules du chemin optimal)

Exemple

Pour chaque route, le rapport entre le nombre de cellules utilisées en simulation et le nombre de cellules entre le réseau optimal est mesuré. Dans le cas de la relation AC, 4 voyages sont réalisés. Le nombre de cellules totales utilisées est de 14 pour les 4 voyages. Le chemin optimal est de 3 cellules, ce qui donne, reporté au nombre de voyages, 12. Cela donne un rapport de 14/12 sur la relation AC soit un résultat de 1,17. Les routes AB et AC sont impactées de 17% de cellules supplémentaires par les perturbations, la route BC est égale à 1 et n'est donc pas impactée.

AC = 14 / (4*3) = 1,17

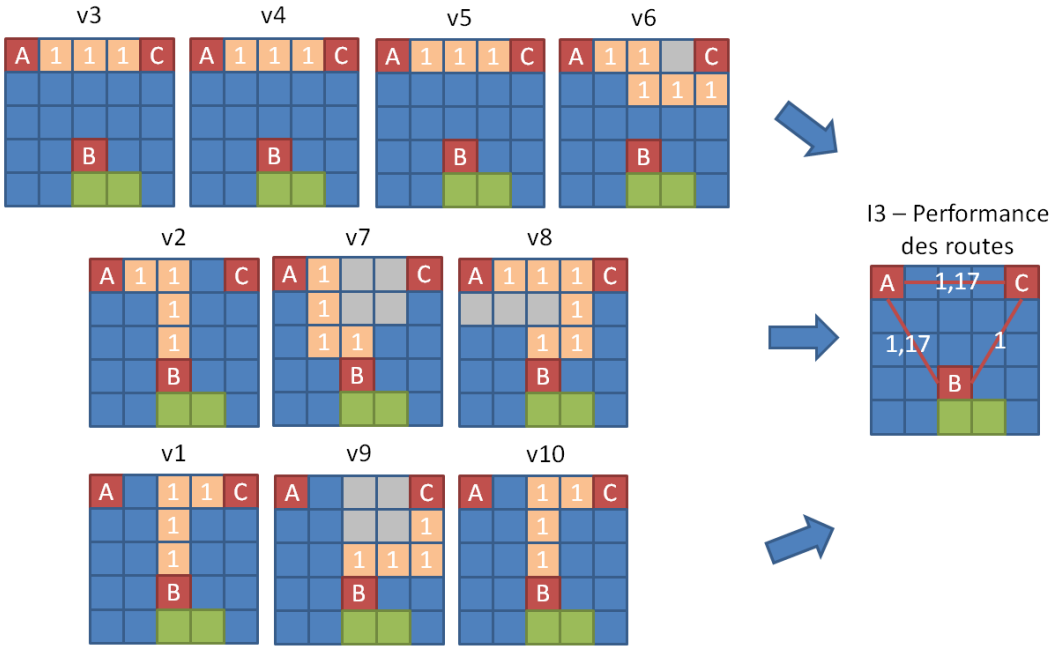


Figure 44. Indice 3 - Performance des routes

Indice 4. Rapport utilisation/intermédiarité

Objectif

Cet indice permet de mesurer le rapport entre l'intermédiarité d'une cellule et sa sollicitation lors des simulations. Cet indice est le rapport entre la matrice des voyages et l'intermédiarité des cellules reportées aux nombres de voyages, soit le réseau optimal (Fig. 45). Si la valeur de l'indice est proche de 1, cela signifie que l'usage s'accorde à la structure spatiale de l'espace maritime. A l'inverse, si cette valeur est éloignée, cela signifie que la cellule est soit surutilisée (supérieur à 1) ou sous-utilisée (inférieur à 1). Seules les cellules ayant une intermédiarité non nulle sont prises en compte par l'indicateur.

Formule

Pour chaque cellule :

I4 = Nombre de passages par cellule / Nombre de passages sur le réseau optimal

Exemple

Pour la cellule ayant la plus forte intermédiarité (=3), le nombre de passages lors des simulations a été de 8. Le nombre de passages dans un réseau optimal est de 10. Cela donne un rapport de 8/10 soit une valeur de 0,8. La cellule est donc sous utilisée par rapport à son positionnement spatial. A l'inverse, la cellule à gauche de celle-ci a enregistré 7 passages.

8 / ((3/3) * 10) = 0,8

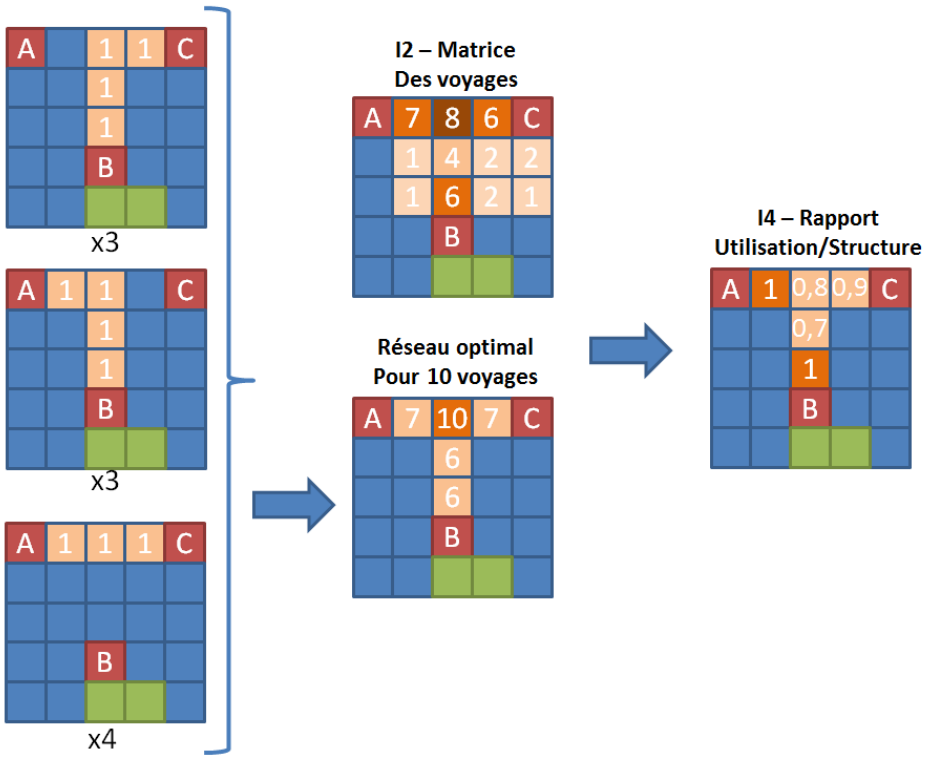


Figure 45. Indice 4 - Rapport utilisation/intermédiarité

Indice 5. Matrice de déviation

Objectif

Cet indice permet de visualiser les cellules utilisées en dehors des chemins optimaux (Fig. 46) Il s'agit de la matrice des voyages auxquels ont été soustraites les cellules ayant une intermédiarité non nulle. Cela permet de visualiser les déviations occasionnées par une ou plusieurs perturbations dans une simulation.

Formule

Pour chaque cellule non-placée sur un chemin optimal :

I5 = Nombre de voyage ayant transité par la cellule.

Exemple

Dans la matrice des voyages, 11 cellules sont utilisées par les navires pour se déplacer dans l'espace. 5 sont placés sur un chemin optimal. Les 6 autres cellules constituent ainsi la matrice de déviation.

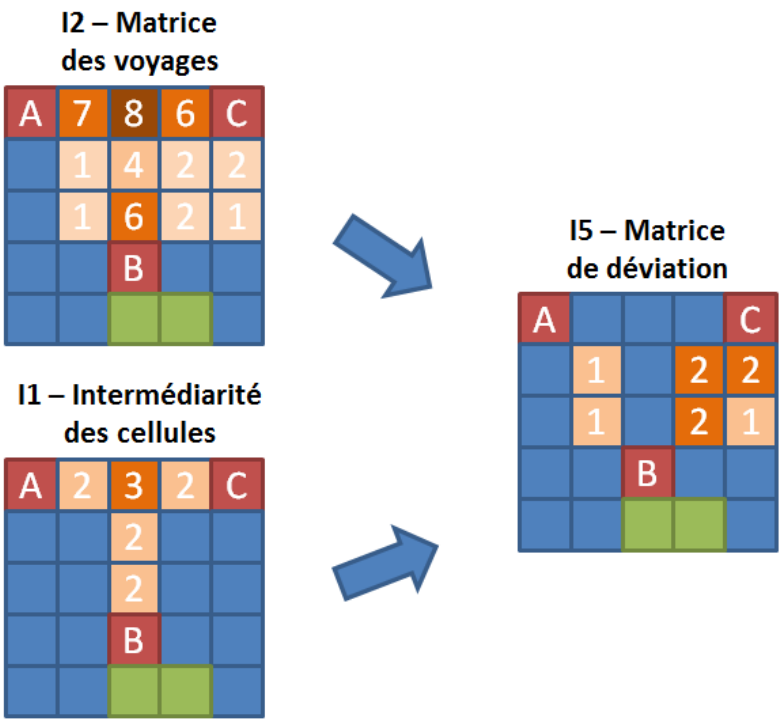


Figure 46. Indice 5 - Matrice des déviations

Indice 6. Retard cumulé des ports

Objectif

Les perturbations ont un impact immédiat sur l'espace, cependant elles peuvent avoir un impact différé sur les différents ports de la simulation (Fig. 47). Pour cela, il faut prendre l'ETA, défini par la vitesse du navire, multiplié par le nombre de cellules du chemin optimal et le comparer au temps effectif en simulation. Cela permet de mesurer le retard cumulatif de chaque port en destination d'un voyage.

Formule

Pour tout port de destination : I6 = Temps de simulation utilisé pour réaliser les voyages - Somme des ETA à l'origine des voyages

Exemple

Dans l'hypothèse où A est l'origine de tout voyage vers B et C et B est l'origine de tout voyage vers C, et que la vitesse des navires est identique et égale à 1. Cela signifie qu'un déplacement correspond à une unité temporelle dans la simulation. L'ensemble des voyages de A vers B utilise 14 unités temporelles pour réaliser les voyages. La somme des ETA au départ de chaque voyage est de 12, considérant que les perturbations sont apparues durant les voyages des navires. Cela donne un retard de 14-12 = 2 unités temporelles pour le port B.

A vers B = (4+4+6) – (4*3) = 2

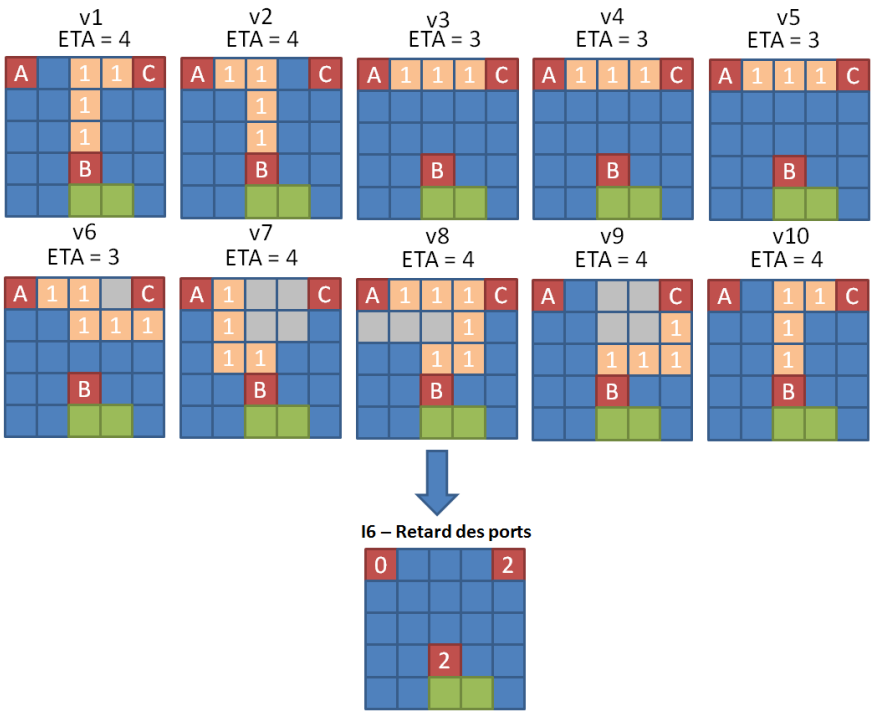


Figure 47. Indice 6 - Retard des ports

Indice 7. Coût additionnel lié à la distance

Objectif

L'indicateur permet de mesurer et agréger l'ensemble de la distance additionnelle liée aux perturbations et de l'associer à un facteur coût défini par l'utilisateur (Fig. 48) Cet indice permet ainsi de mesurer les pertes de performances globales du réseau, liées aux perturbations spatiales et spatio-temporelles.

Formule

Pour tout réseau :

I7 = Coût * (Nombre total de cellules utilisées pour le transport – Nombre total de cellules pour le réseau optimal)

Exemple

Pour un coût arbitraire de 10, et un total de cellules utilisées de 43 sur 10 voyages avec un nombre optimal de 36 cellules pour 10 voyages, le coût supplémentaire lié à la distance est de I7 = 10 * (40 – 36) = 40.

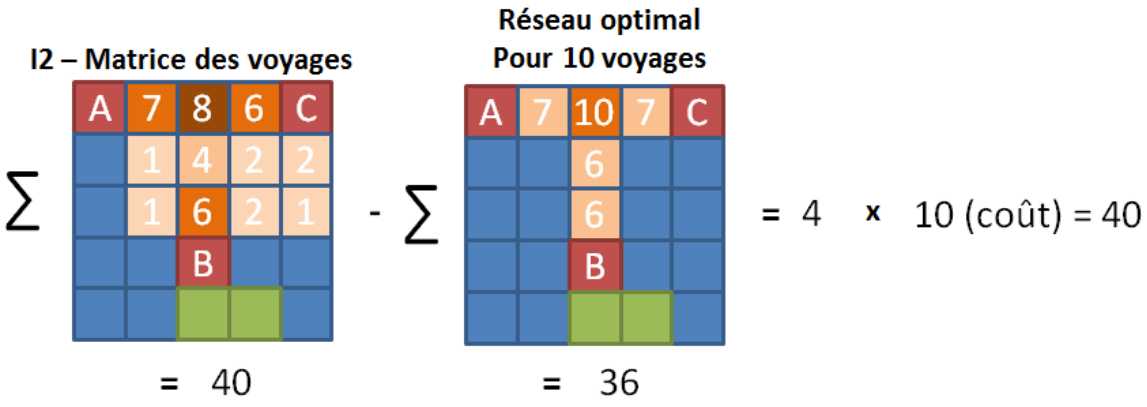


Figure 48. Indice 7 - Coût additionnel lié à la distance

Indice 8. Coût additionnel lié aux retards

Objectif

L'indicateur permet de mesurer et agréger l'ensemble du temps additionnel lié aux perturbations accumulées dans l'ensemble des ports et de l'associer à un facteur coût défini par l'utilisateur (Fig. 49).

Formule

Pour tout réseau :

I8 = Coût * (Nombre total d'unités temporelles de retard cumulé dans les ports)

Exemple

Pour un coût arbitraire de 10, et un total d'unités temporelles de 4, le coût des retards est de 40.

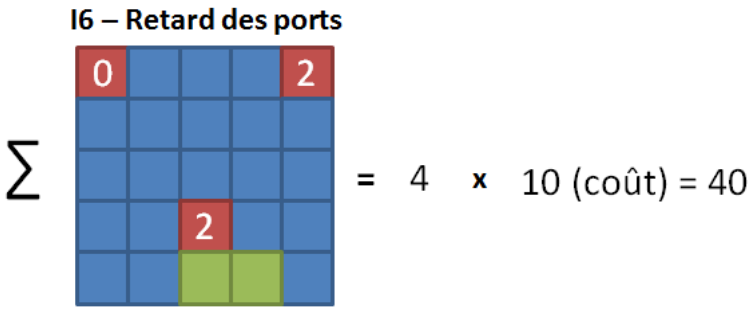


Figure 49. Indice 8 - Coût additionnel lié aux retards

Ce tableau récapitulatif permet de montrer l'ensemble des indicateurs :

	Type	**Local/Global**	**Mesure dans la simulation**	**Méthode de mesure**
1. Intermédiarité d'une cellule	Accessibilité spatiale statique	Locale (cellule)	Statique	Nombre de plus courts chemins transitant au travers une cellule maritime
2. Matrice des voyages	Accessibilité spatiale dynamique	Locale (cellule)	Dynamique	Nombre de passages de navires sur une cellule maritime
3. Performance spatiale d'une route	Accessibilité spatiale dynamique)	Locale (route)	Dynamique	Nombre de cellules utilisées pour les voyages entre deux ports / (Nombre de voyages * Nombre de cellules du chemin optimal)
4. Corrélation entre usage et structure	Accessibilité spatiale dynamique	Locale (cellule)	Dynamique	Nombre de passages par cellule / Nombre de passages sur le réseau optimal
5. Matrice de déviation	Accessibilité spatiale dynamique	Locale (cellule)	Dynamique	Nombre de voyages ayant transités dans une cellule à l'intermédiarité nulle.
6. Retard accumulés des ports	Capacité dynamique	Locale (port)	Dynamique	Temps de simulation utilisé pour réaliser les voyages - Somme des ETA à l'origine des voyages
7. Coût additionnel lié à la distance	Fonction spatio-économique	Globale	Dynamique	Coût * (Nombre total de cellules utilisées pour le transport – Nombre total de cellules pour le réseau optimal)
8. Coût additionnel lié aux retards	Fonction temporelle et économique	Globale	Dynamique	Coût * (Nombre total d'unités temporelles de retard cumulé dans les ports)

L'ensemble de ces indicateurs sont mesurés à partir des attributs des différentes classes du modèle. Ces indicateurs sont représentés dans le diagramme suivant (Fig. 50) :

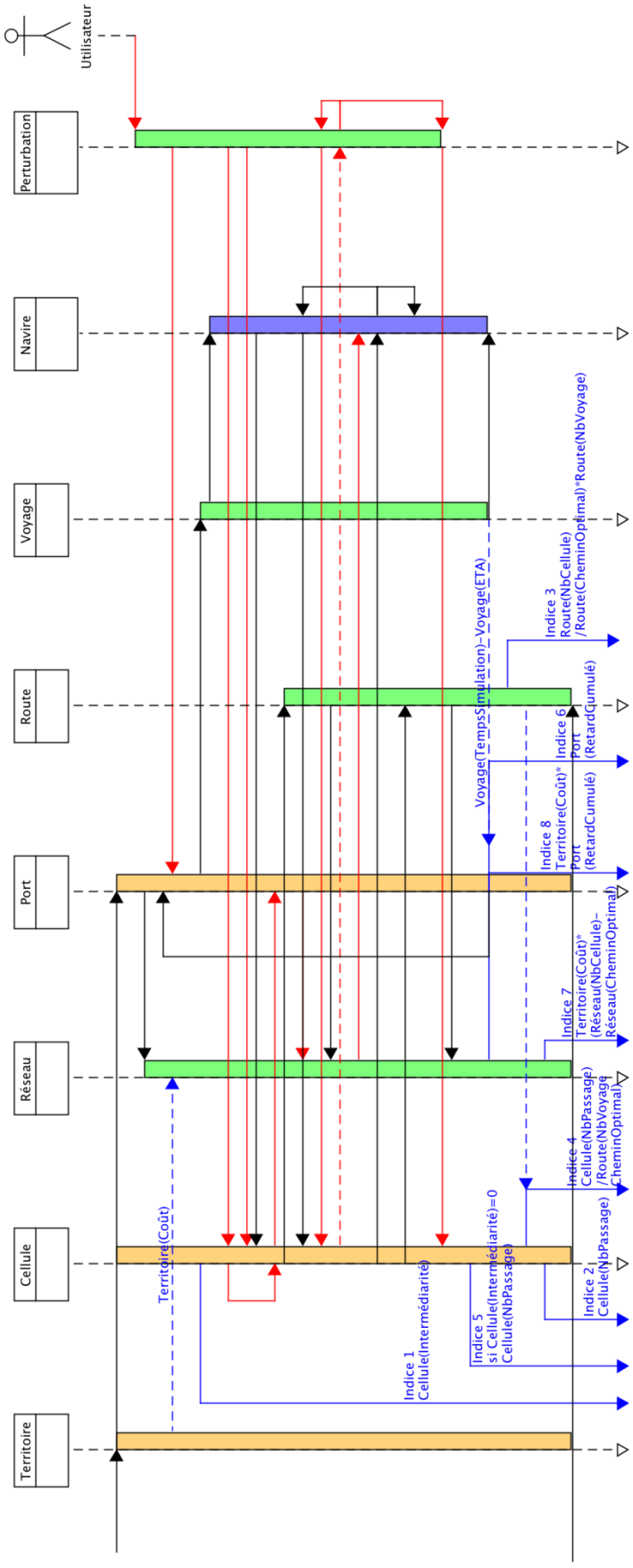


Figure 50. Diagramme de séquence du calcul des indicateurs dans le système de simulation

3.6 Implémentation du système de simulation

AnyLogic a été choisi afin de réaliser le prototype permettant la simulation de la vulnérabilité du réseau maritime. L'implémentation du système a été effectuée par Maysam Zoor (Zoor, 2017) de l'Université Libanaise, pour son stage de fin d'étude en Master Système d'information - Gestion des risques, lors de son stage de fin d'étude au Centre de recherche sur les Risques et les Crises.

Anylogic est une plate-forme de programmation et de simulation basée sur Java qui prend en charge la modélisation basée sur les agents. Anylogic a été choisi car c'est un outil complet, flexible et adaptable permettant la modélisation et la simulation agent. Plusieurs éléments ont permis de choisir AnyLogic pour l'implémentation du modèle (Kravari et Bassiliades, 2015) :

- C'est un outil complet offrant un grand nombre de solutions technologiques.
- C'est également un outil performant, stable et robuste permettant un bon processus de développement
- Il existe une documentation riche et fournie permettant de faciliter l'implémentation du modèle ainsi qu'une technologie stable.
- Il a une bonne interface graphique, ainsi que de classes prédéfinies accélérant et facilitant la phase d'implémentation du modèle.

En outre, il simplifie le développement des modèles basés sur les agents en fournissant des modèles de conception réutilisables dans l'architecture de modèle, la synchronisation d'agents par étapes, différents modèles spatiaux (carte continue, discrète ou GIS), des modèles de connexions et de communication d'agents (comme réseaux sociaux) ainsi que la création et la destruction dynamique des agents.

3.6.1 Modélisation de l'espace de simulation

Pour modéliser l'espace dans AnyLogic, un espace continu est utilisé. Cet espace continu est ensuite discrétisé à partir d'agents localisateurs. Cette solution a été retenue puisque cela permet de pouvoir stocker plusieurs agents mobiles à l'intérieur d'un agent localisateur, ce qui n'est pas le cas de l'espace discrétisé déjà disponible dans AnyLogic, qui ne peut être utilisé que dans le cadre d'automates cellulaires.

Ces agents localisateurs possèdent une localisation spécifique et généralisée dans l'espace de simulation (Fig. 51) :

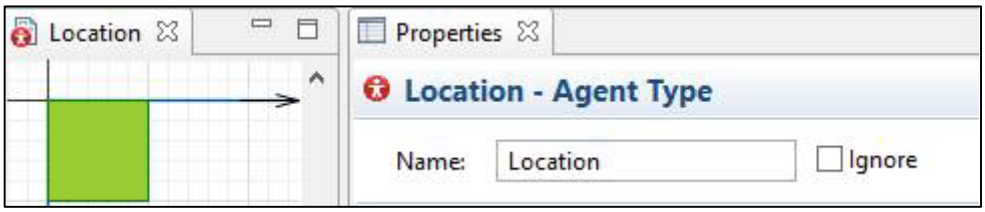


Figure 51. Spécification des agents sous AnyLogic

Ces agents localisateurs permettent de mettre en place une grille régulière permettant de modéliser l'espace maritime au travers des cellules régulières (Fig. 52)

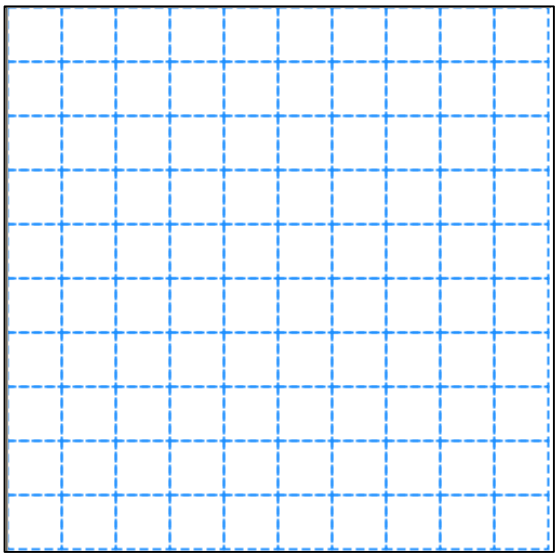


Figure 52. Implémentation de l'espace de simulation sous AnyLogic

Ensuite, l'étape suivante est de spécifier un type pour chaque cellule contenue dans la grille. En effet chaque cellule a sa propre variable, associée à un niveau d'accessibilité. Ainsi les cellules terrestres sont inaccessibles pour le transport maritime (valeur : 0) alors que les cellules « maritimes » et les « ports » sont parfaitement accessibles (valeur : 1). Des règles topologiques ont été ajoutées, comme la connexité de l'espace maritime, à savoir qu'une cellule maritime est nécessairement reliée à l'ensemble de celle-ci. Ensuite l'utilisateur peut définir le pourcentage de cellules maritimes afin de générer une interface terre-mer géographiquement cohérente (Fig. 53).

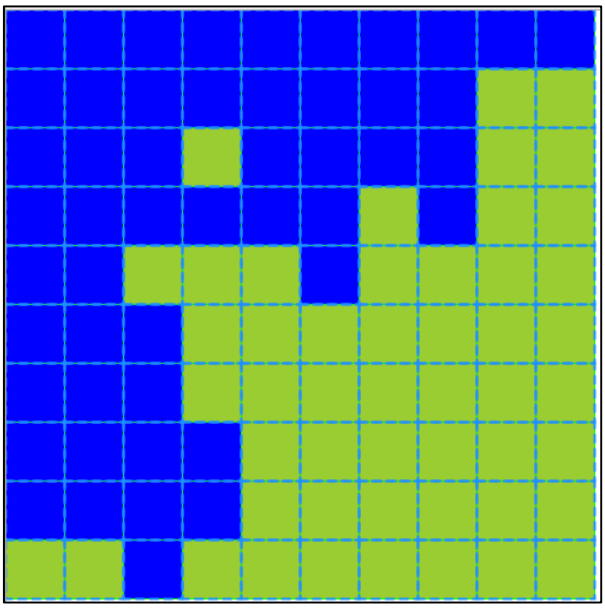


Figure 53. Implémentation des cellules maritimes et terrestres sous AnyLogic

Ensuite, les cellules « ports » sont ajoutées en fonction du nombre de ports défini par l'utilisateur. Ceux-ci sont des cellules « terrestres » ayant au minimum un voisin « maritime », permettant de générer les ports dans une position d'interface entre les cellules terrestres et maritimes. L'espace de simulation est alors généré (Fig. 54)

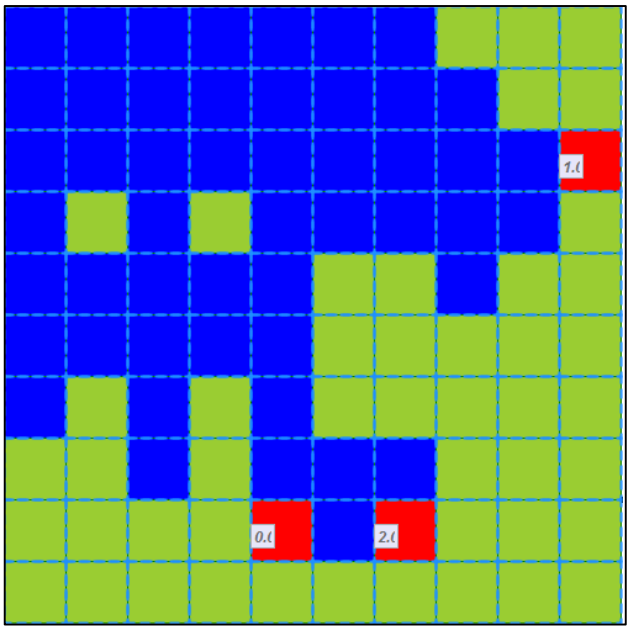


Figure 54. Implémentation des ports sous AnyLogic

3.6.2 Modélisation des routes maritimes et des navires

Chaque port généré dans l'espace se voit attribuer un niveau d'offre et de demande. Ces variables permettent ainsi de faire fonctionner le modèle gravitaire générant les voyages dans l'espace de simulation. En effet, le modèle gravitaire nécessite les volumes d'offre et de demande de chaque port, pondérés de leurs distances respectives.

Pour obtenir ces distances, l'algorithme de plus court chemin Djisktra a été implémenté dans le modèle (Fig. 55) :

```
Foreach node set distance[node] = HIGH
SettledNodes = empty
UnSettledNodes = empty

Add sourceNode to UnSettledNodes
distance[sourceNode]= 0

while (UnSettledNodes is not empty) {
    evaluationNode = getNodeWithLowestDistance(UnSettledNodes)
    remove evaluationNode from UnSettledNodes
    add evaluationNode to SettledNodes
    evaluatedNeighbors(evaluationNode)
}

getNodeWithLowestDistance(UnSettledNodes){
    find the node with the lowest distance in UnSettledNodes and return it
}

evaluatedNeighbors(evaluationNode){
    Foreach destinationNode which can be reached via an edge from evaluationNode AND which is
not in SettledNodes {
        edgeDistance = getDistance(edge(evaluationNode, destinationNode))
        newDistance = distance[evaluationNode] + edgeDistance
        if (distance[destinationNode]  > newDistance ) {
            distance[destinationNode]  = newDistance
            add destinationNode to UnSettledNodes
        }
    }
}
```

Figure 55. Implémentation de l'algorithme de Djisktra sous AnyLogic

Cela permet d'obtenir une matrice de distance entre les différents ports de l'espace de simulation. En appliquant la formulation reprise à Rodrigue (2013) à savoir Volume [Port A][Port B] = Offre(A)*Demande(B)/Distance(AB)² il est ainsi possible de générer des voyages en fonction de la localisation géographique des ports.

L'étape suivante est de générer un graphe unidirectionnel entre chaque port. En effet, dans la mesure où des volumes sont générés de chaque sens pour une paire de ports, la direction où le volume est le plus important est sélectionné, et les échanges mesurés dans l'autre direction sont

déduits afin d'obtenir une valeur à transporter unidirectionnelle. Enfin, une fois l'échange terminé, le stock des ports est actualisé afin de pouvoir faire mettre à jour les niveaux d'offre et de demande des ports.

Ainsi, l'implémentation du modèle gravitaire permet de générer les voyages à effectuer dans l'espace de simulation. Ceux-ci sont ensuite opérés par les navires, modélisés sous forme d'agents.

Les navires sont décrits dans la partie précédente comme des agents, ayant comme attributs les variables suivantes : coordonnées, origine, destination, capacité, volume, vitesse et taille.

La taille correspond à la capacité que le navire peut transporter. 3 différentes tailles de navire existent dans le modèle : 5, 10 et 20. Ces dimensions sont générées en fonction des volumes déterminés par le modèle gravitaire. La taille est distinguée graphiquement par la couleur de l'agent, respectivement vert, orange et jaune et par sa dimension affichée dans l'espace de simulation (Fig. 56).

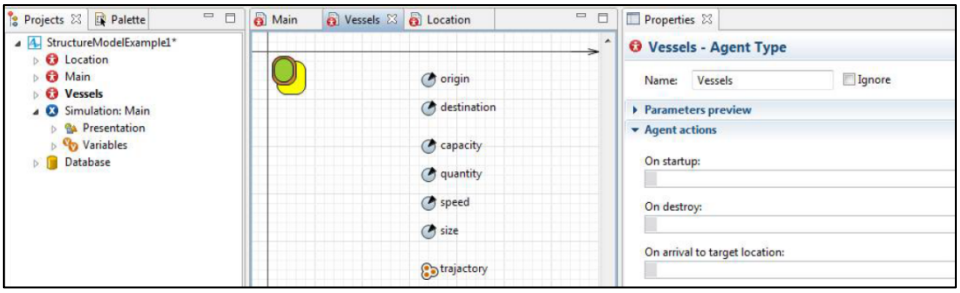


Figure 56. Implémentation des navires sous AnyLogic

Les agents sont créés à partir des données du modèle gravitaire. Leur processus de vie de la création des navires est modélisé sous AnyLogic de la manière suivante (Fig. 57) :

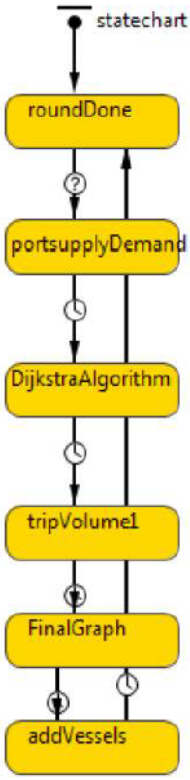


Figure 57. Processus de calcule des voyages

Une fois le système initialisé, les volumes des ports sont générés, l'algorithme de plus court chemin, puis le modèle gravitaire, définissent les voyages. En résulte un graphe orienté définissant les voyages à effectuer. En fonction de ce volume les navires sont créés. Les navires de dimension 20 sont créés en priorité, ensuite ceux de dimension 10 puis ceux de dimension 5. Si le volume restant est inférieur à 5 alors le navire est créé avec une taille 5 mais un volume transporté inférieur. Ce processus est effectué pour chaque port ayant une demande excédentaire à son offre.

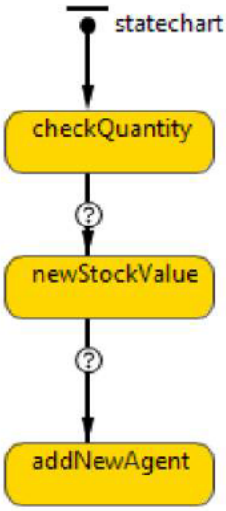


Figure 58. Processus de recalcul des volumes

Dans les itérations suivantes, les navires sont créés à partir des stocks nouvellement mis à jour par le modèle gravitaire (Fig. 58), cela permet de générer un trafic maritime permanent et renouvelé entre les différents ports répartis dans l'espace de simulation.

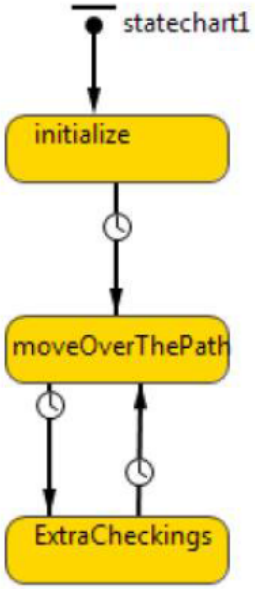


Figure 59. Processus de déplacement des navires

Une fois cette étape terminée, les navires calculent dynamiquement leurs trajectoires après chaque déplacement (Fig. 59). A la création du navire, une trajectoire optimale, le plus court chemin entre le port d'origine et de destination est sélectionné. Cependant, à chaque déplacement le navire vérifie son environnement et les propriétés des cellules (accessibilité, capacité) afin de modifier et réadapter leurs trajectoires si jamais celles- ci venaient à être perturbées ou modifiées. Une fois la destination atteinte, le stock est réattribué au port de destination et le navire est détruit.

3.6.3 Implémentation des perturbations

Les perturbations sont des événements, choisis par l'utilisateur afin de tester plusieurs types de scénarios. Ces perturbations peuvent être de différentes natures, et 4 catégories de perturbations sont implémentés : les perturbations économiques, spatiales, spatio-temporelles et spatio-temporelles adaptatives.

3.6.3.1 Perturbations économiques

Les perturbations économiques sont modélisées en amont du voyage, en modifiant les volumes d'offre et de demande des ports. Ces perturbations peuvent être utilisées pour modéliser des scénarios tels que les pénuries, les cycles économiques ou les troubles géopolitiques.

Pour cela, l'utilisateur dispose d'une barre coulissante, permettant de limiter les volumes générés durant la simulation (Fig. 60). Ces barres déterminent la valeur maximale d'un nombre généré aléatoirement étant affecté au volume d'offre ou de demande d'un port. En modifiant ce paramètre, cela affecte la création de voyage de chacun des ports de l'espace de simulation. Par défaut, la valeur choisie par l'utilisateur sera alors utilisée comme borne supérieure de l'affectation aléatoire des valeurs d'offre et de demande. Autrement dit, l'utilisateur peut simuler des situations de pénurie ou de surproduction d'un bien.

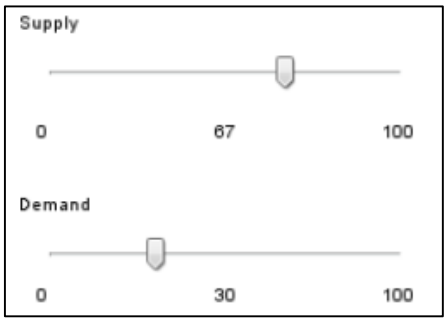


Figure 60. Contrôles utilisateur pour générer les perturbations économiques

3.6.3.2 Perturbations spatiales

La seconde catégorie de perturbations implémentées concerne les perturbations spatiales. Les perturbations spatiales sont une modification de la structure de l'espace de simulation. Il s'agit d'une modification du type d'une ou d'un groupe de cellules. Ces modifications sont déclenchées par l'utilisateur en utilisant le clic de la souris sur la cellule choisie (Fig. 61). Ces perturbations sont utilisées pour les scénarios de fermeture/ouverture de port, fermeture de canal, ajout d'une zone interdite dans l'espace maritime ou changement de réglementation. Pour cela il est nécessaire d'enclencher l'option perturbation spatiale dans la fenêtre des perturbations.

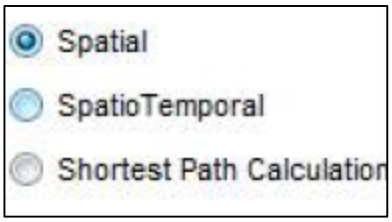


Figure 61. Contrôles utilisateur pour générer les perturbations spatiales

Si la cellule sélectionnée est de type maritime, celle-ci est transformée en perturbation statique, et son accessibilité est diminuée de moitié. (Fig. 62). Cliquer une seconde fois sur la cellule permet de retrouver l'état initial de celle-ci.

De la même manière, il est possible d'ajouter/supprimer des ports sur les cellules terrestres, cela peut permettre de modifier la structure du réseau et de tester de nouvelles configurations.

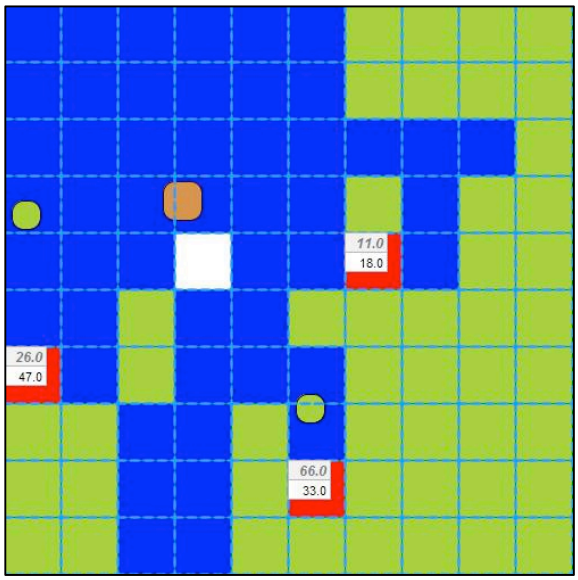


Figure 62. Perturbation spatiale implémentée dans l'espace de simulation

3.6.3.3 Perturbations spatio-temporelles

La troisième catégorie est la catégorie des perturbations spatio-temporelles. Ces perturbations sont utilisées pour des scénarios de tempêtes, d'icebergs, OFNI, de pollutions diverses. Celles-ci sont des objets dynamiques, évoluant dans l'espace de simulation en fonction de plusieurs paramètres cinétiques (Fig. 63) :

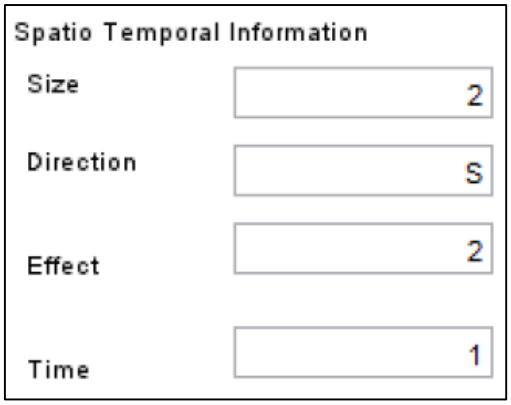


Figure 63. Contrôles utilisateur pour générer les perturbations spatio-temporelles

L'utilisateur sélectionne les paramètres du mouvement (extension spatiale, vecteur, impact, vitesse) et clique sur la cellule d'origine de la perturbation. L'impact de la cellule est modélisé comme une distance supplémentaire sur la distance totale en fonction du scénario modélisé, un ouragan a par exemple un impact plus important sur l'accessibilité qu'une marée noire ou qu'une pollution en mer. Le déplacement de ces perturbations est pris en compte par les navires qui recalculent dynamiquement leurs trajectoires (Fig. 64)

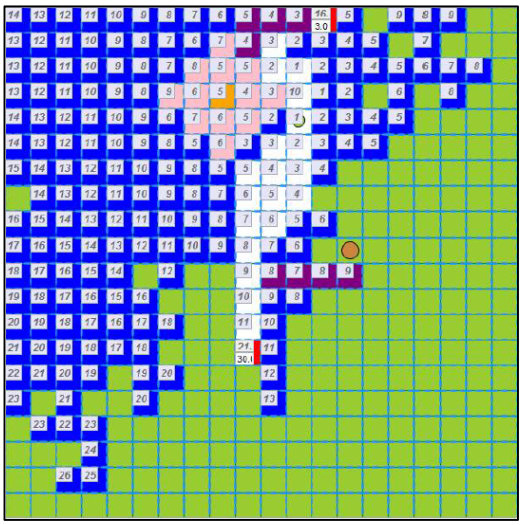


Figure 64. Perturbation spatio-temporelle implémentée dans l'espace de simulation

De plus les perturbations spatio-temporelles peuvent également être « adaptatives » à savoir avoir pour vecteur non pas une direction définie mais se déplacer en fonction du voisin (en distance de Neumann) qui enregistre le plus de passages de navires. Ce type de perturbation a été ajouté pour modéliser des scénarios tels que la piraterie maritime ou les risques d'attaques terroristes en mer. L'ensemble de ces scénarios seront testés, simulés et validés dans la partie suivante.

Conclusion du chapitre 3

Une démarche de modélisation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime a été proposée. Celle-ci se base sur la théorie des graphes ainsi que la modélisation à base d'agents afin de simuler le réseau maritime et de tester plusieurs scénarios de perturbations.

Cette démarche a été décrite en fonction du protocole ODD (*Overview, Design concepts, and Details)* et du langage de modélisation AML (*Agent Modelling Language*) adapté de l'UML 2.0. L'ensemble des composants du modèle ont été modélisés et détaillés par

[2] un diagramme de classe et le processus de simulation a été décrit au travers un diagramme de séquence.

Des indicateurs spécifiques à un médiateur spatial surfacique ont été proposés et élaborés. Ces indicateurs sont liés à la structure spécifique choisie (une grille régulière carrée généralisée) et sont mesurés de manière dynamique, ce qui permet aux indicateurs d'évoluer au cours de la simulation. De plus des indicateurs liés à la capacité des ports et de l'espace maritime ont été mis en place permettant d'enrichir le nombre d'indicateurs.

Le système de simulation a été implémenté sur la plateforme de modélisation et simulation AnyLogic. Celle-ci apporte un environnement de développement complet qui a permis le développement d'un prototype permettant de tester les divers scénarios de perturbations modélisées. Au travers d'une fenêtre de contrôle l'utilisateur peut ainsi tester les modifications du réseau maritime par le déclanchements d'événements perturbateurs.

Chapitre 4 : Utilisation du système de simulation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime

Le système de simulation mis en place a pour objectif d'évaluer la vulnérabilité du réseau maritime face à des perturbations. Pour cela le système doit être en mesure de simuler plusieurs types de scénarios, puis de les évaluer avec des indicateurs mis en place dans la partie précédente. Ainsi, dans cette partie des scénarios de simulation sont mis en place afin d'évaluer la vulnérabilité du réseau maritime aux perturbations maritimes.

4.1 Objectifs du système de simulation

L'objectif du système de simulation est d'évaluer dans la vulnérabilité du réseau maritime dans un contexte de planification des espaces maritimes.

La planification des espaces maritimes, à savoir une gestion intégrée des activités maritimes est progressivement mise en place dans les Etats afin de répondre à plusieurs objectifs. Selon le North Sea 2050 Spatial Agenda (Ministère des infrastructures et de l'environnement, Pays-Bas, 2014) l'amélioration de la sécurité, le maintien de l'accessibilité des ports et leurs régions ainsi que la prévention des accidents sont les objectifs majeurs d'un transport maritime intégré à un plan de planification maritime. Intégrés à la planification maritime, les enjeux d'un transport intégré sont multiples face aux changements liés à l'environnement et aux usages nouveaux en mer.

L'accessibilité des ports par la mer est un enjeu entrant dans la direction européenne INSPIRE (Commission Européenne, 2016). En effet, les usages de la mer s'intensifiant, il est nécessaire d'éviter les problèmes de conflits d'usage de l'espace. Ainsi la question de l'accessibilité aux ports et à l'espace maritime est une problématique dont les enjeux se renforceront dans les années à venir. En effet la planification des espaces maritimes va amener plusieurs types d'évolutions modifiant le transport maritime :

- **L'accessibilité des ports et des routes maritimes associées :** les ports restent et demeurent des lieux centraux dans l'espace des échanges mondialisés, garantir leur accessibilité, par la mer, mais également par voie terrestre, est essentiel pour préserver les relations économiques. C'est un enjeu majeur puisque le gigantisme des navires et le renforcement de routes majeures augmentent l'enjeu économique du réseau maritime. Ainsi assurer l'accessibilité par la mer est un enjeu pour l'avenir du réseau maritime.

- **Développement de la capacité des ports :** L'accessibilité ne permet pas à elle seule à maintenir la performance du réseau, les ports ont également pour enjeu de maintenir leur capacité d'accueil des navires face à l'intensification des échanges pour le chargement et le déchargement de marchandises en flux tendu. De surcroît, l'augmentation de la taille des navires contraint les ports à s'adapter pour accueillir les navires les plus récents.
- **Ouverture de nouvelles routes maritimes :** Les évolutions économiques et climatiques permettent l'ouverture de nouvelles routes maritimes. Celle qui aura le plus d'impact sur la configuration du réseau est la route polaire arctique, reliant l'Europe à l'Asie de l'Est avec l'océan Arctique en empruntant le détroit de Bering. Ces nouvelles routes auront des conséquences sur la hiérarchie des ports mais également sur l'utilisation de l'espace maritime pour le transport.
- **Modification des routes existantes :** La planification des espaces maritimes peut amener à l'avenir une modification des DST (dispositif de séparation du trafic) en fonction des nouveaux usages de l'espace maritime. L'essor de l'éolien offshore devrait à terme créer de nouvelles routes pour la maintenance des parcs, mais également modifier d'anciennes routes réservées aujourd'hui au transport.
- **Interdiction de nouvelles zones :** La planification des espaces maritimes aura pour conséquence d'attribuer des espaces à des activités bien précises afin d'éviter les conflits d'usage. Cela aura alors pour conséquence de réduire voire d'interdire certaines zones utilisées jusqu'ici pour le transport maritime. Les zones protégées tel que Natura 2000, ou les zones de pêches réservées, pourraient devenir plus nombreuses et à terme déplacer et exclure le transport maritime de ces zones.
- **Gestion du trafic maritime :** L'accroissement de certaines routes et la présence de nouveaux usages pousseront à avoir des zones de navigation plus denses, sous pression, notamment dans les espaces côtiers, ce qui peut intensifier les risques de collision des navires. Cela peut amener à l'avenir à créer une nouvelle législation pour la régulation du trafic dans des zones à fort enjeu stratégique.

Le système permet de prendre en compte l'ensemble de ces points et de les tester sur un espace maritime généré aléatoirement :

<table>
<tr><th>Enjeu de planification maritime</th><th>Objectif du système de simulation</th><th>Prise en compte dans le modèle</th></tr>
<tr><td>Enjeu 1
Assurer l'accessibilité des ports et des routes maritimes associées</td><td>Objectif 1
Simuler l'interaction entre le réseau maritime et l'espace maritime.</td><td>Le modèle permet de tester le réseau face à plusieurs types d'événements via les perturbations économiques, spatiales et spatio-temporelles.</td></tr>
<tr><td>Enjeu 2
Assurer le développement de la capacité des ports</td><td>Objectif 2
Simuler la capacité des ports et la temporalité des voyages face aux modifications de l'espace maritime</td><td>Le modèle permet avec la variable « capacité » des ports de tester la capacité de gestion face aux retards imputables aux perturbations.</td></tr>
<tr><td>Enjeu 3
Tester l'ouverture de nouvelles routes maritime</td><td rowspan="3">Objectif 3
Simuler les modifications du réseau suite à l'ouverture d'un port ou l'ajout d'un obstacle dans l'espace modifiant les routes maritimes.</td><td rowspan="3">Le modèle permet d'ajouter ou de supprimer des ports afin de tester de nouvelles routes maritimes et ainsi tester le réseau en fonction d'une nouvelle configuration de l'espace maritime.</td></tr>
<tr><td>Enjeu 4
Tester les modifications des routes existantes</td></tr>
<tr><td>Enjeu 5
Tester le réseau face à l'interdiction de nouvelles zones</td></tr>
<tr><td>Enjeu 6
Gérer les évolutions du trafic maritime</td><td>Objectif 4
Simuler le réseau maritime et observer l'ensemble de modifications liées aux perturbations.</td><td>Le modèle permet avec la variable « capacité » » des cellules de tester le trafic en fonction de la capacité de celle-ci.</td></tr>
</table>

Pour réaliser l'ensemble de ces objectifs, les indicateurs peuvent être utilisés. Ces indicateurs, permettent de répondre aux objectifs du modèle pour la planification des espaces maritimes :

<table>
<tr><th>Objectifs</th><th colspan="3">Indicateur et informations issues des simulations</th></tr>
<tr><th></th><th>Perturbations économiques</th><th>Perturbations spatiales</th><th>Perturbations spatio-temporelles</th></tr>
<tr><td>Objectif 1
Assurer l'accessibilité des ports et des routes maritimes associées</td><td rowspan="4">Baisse/Augmentation du nombre de voyages</td><td colspan="2">Indice 1 – Intermédiarité des cellules
Indice 3 – Performance des routes maritimes
Indice 4 – Rapport usage/structure</td></tr>
<tr><td>Objectif 2
Tester la répercutions des pertes de performance sur les ports</td><td colspan="2">Indice 6 – Retard des ports de destination
Indice 8 – Coût additionnel lié au temps</td></tr>
<tr><td>Objectif 3
Tester l'ajout d'éléments structurant l'espace maritime</td><td colspan="2">Indice 3 – Performance des routes maritimes
Indice 4 – Rapport usage/structure
Indice 5 – Matrice de déviation
Indice 7 – Coût additionnel lié à la distance</td></tr>
<tr><td>Objectif 4
Gérer la modification du trafic maritime</td><td colspan="2">Indice 2 – Matrice des voyages
Indice 7 – Coût additionnel lié à la distance</td></tr>
</table>

4.2 Elaboration des scénarios de simulation

Plusieurs scénarios sont ensuite mis en place pour tester l'environnement de simulation. Par scénario, il faut entendre, outre une perturbation choisie et placée par l'utilisateur (perturbation économique, spatiale, spatio-temporelle) un ensemble de paramètres de simulation qui influence la construction du réseau: la structure spatiale, le nombre de ports, le pourcentage de cellules maritimes et le temps de simulation.

Ainsi, les scénarios ont été établis en fonction des paramètres suivant :

La structure spatiale : Plusieurs tailles de structures spatiales sont testées dans les scénarios. La taille de la structure peut avoir plusieurs effets sur les simulations (Fig. 65). En effet, les cellules placées sur les côtés ou dans les coins de la structure ne disposent que de 2 ou 3 voisins contrairement aux cellules placées au centre qui disposent de 4 voisins (en distance de Van Neumann). Cependant, si agrandir la structure a pour conséquence de diminuer les effets de bords, cela a également pour effet d'augmenter exponentiellement le nombre de relations, augmentant ainsi fortement le temps de calcul de simulation. La dimension de 20*20 a été choisie pour réaliser la majeure partie des scénarios, mais des scénarios dans des structures de 10*10 et 30*30 cellules de côtés seront également testées pour évaluer l'influence de la taille de la structure sur les résultats des simulations.

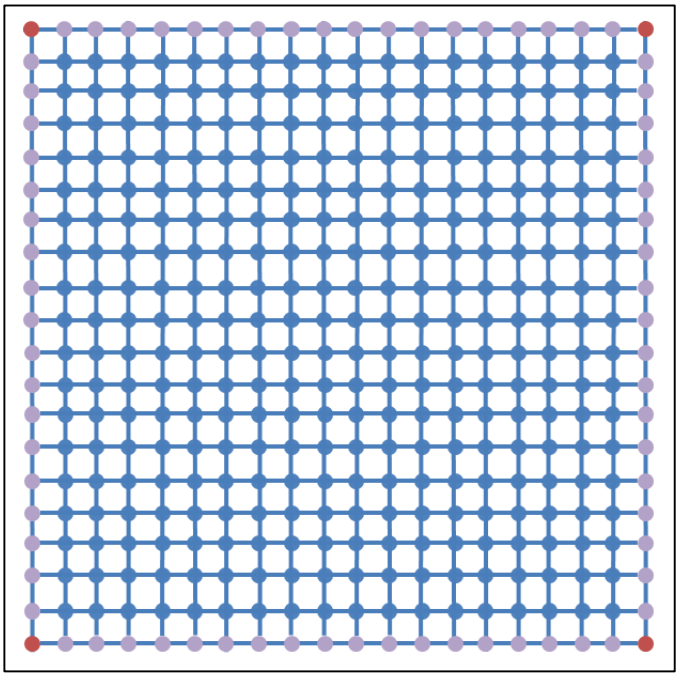


Figure 65. Structure spatiale de 20*20 cellule et relation de voisinage en distance de Von Neumann

Dimension de la grille	Cellules 2 voisins	Cellules 3 voisins	Cellules 4 voisins	Total cellules	Nombre de relations de voisinage
10*10	4	32	64	100	180
20*20	4	72	324	400	760
30*30	4	112	784	900	1912

Le nombre de ports : Les ports sont des cellules, aléatoirement placées dans l'espace de simulation à l'interface terre/mer. Chaque relation entre deux ports constitue ainsi une route. Ainsi le réseau maritime correspond à un graphe complet dans lequel s'effectuent des échanges de volume. Cependant, le rapport entre le nombre de nœuds (ports) et de liens (routes) augmente de manière polynomiale dans un graphe complet, pouvant vite arriver à décupler le temps de calcul nécessaire à la simulation (Fig. 66). Pour une grande majorité des scénarios un nombre de 5 ports, et donc 10 routes maritimes a été choisi avec des expérimentations avec 3 ports et 10 ports. Les réseaux obtenus sont par définition des graphes complets, à savoir qu'un voyage peut être généré entre chaque paire de nœuds. Ainsi le nombre de routes pour un graphe à n ports possède n(n-1)/2 routes.

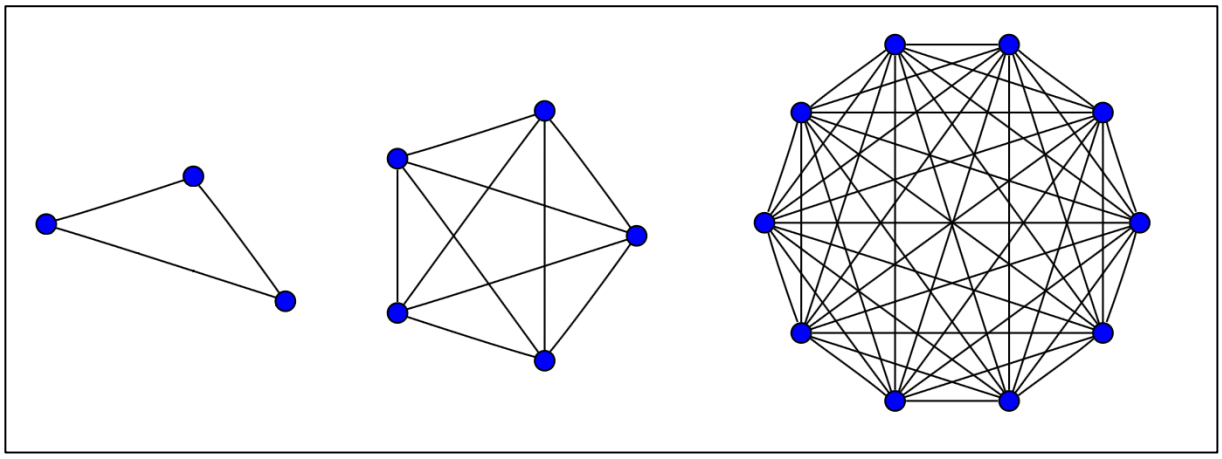


Figure 66. Graphe complet de 3, 5 et 10 nœuds.

Taille du réseau	Nombres de routes	Total composants
3 ports	3	6
5 ports	10	15
10 ports	45	55

Les types de perturbations : Plusieurs types de perturbations ont été décrits, ceux-ci pouvant être utilisés pour simuler plusieurs types d'évènements. Ces types de perturbations ont été conceptualisés afin de correspondre à des événements pouvant survenir dans l'espace maritime. Cela permet de modéliser les différents événements statiques et dynamiques se produisant dans l'espace maritime. Ces scénarios sont :

Type de perturbation	Exemple d'événements modélisés	Objectifs associés	Paramètres de modélisation des perturbations
Perturbation économique	Crises économiques et géopolitiques, augmentation de la demande ou de l'offre, pénuries.	Objectif 2, 4	Niveau d'offre général, niveau de demande général.
Perturbation spatiale	Fermeture de ports, de canaux ou de checkpoints (détroits..), structures offshores, changement de réglementation, zones interdites.	Objectif 1, 3, 4	Localisation, taille, forme.
Perturbation spatio-temporelle	Marées noires, tempêtes, tsunamis, icebergs.	Objectif 1, 3, 4	Localisation, taille forme, vitesse, extension, impact, direction.
Perturbation spatio-temporelle adaptative	Piraterie maritime, terrorisme en mer.	Objectif 1, 3, 4	Localisation, taille forme, vitesse, extension, impact

Deux scénarios avec perturbation économique, douze avec des perturbations spatiales et trois de perturbations spatio-temporelles dont une adaptative sont simulées. Les perturbations économiques seront utilisées pour simuler une baisse de volume d'offre des échanges, les perturbations économiques seront utilisées pour simuler une nouvelle zone interdite, placée en partie sur le réseau optimal et enfin les perturbations spatio-temporelles seront utilisées pour simuler les tempêtes de deux tailles différentes.

Le pourcentage de cellules maritimes : En fonction des scénarios, le pourcentage de cellules maritimes peut être modifié. Pour la plus grande partie des scénarios, le pourcentage de cellules maritimes est de 70%, celui-ci étant proche de la répartition réelle terre/mer. Cependant, plusieurs types d'espaces plus contraints seront également testés avec des scénarios à 50 et 60%. Un scénario avec plus de cellules maritimes (80%) sera également testé. Plus le nombre de cellules maritimes est faible, plus les possibilités de déplacements sont contraintes et donc les pertes de performance spatiales et temporelles importantes.

Mode de la capacité de gestion : Deux comportements ont été prévus dans le système pour gérer la capacité de l'espace et des ports pour les navires. Le premier, l'attente, à savoir d'attendre que l'espace soit libéré pour continuer un déplacement est privilégié. Cependant des scénarios avec des changements de ports en cas de surcapacités de ceux-ci sont également testés.

Temps de simulation : Le temps n'est dans les scénarios pas différencié. En effet, vu que les perturbations sont déclenchées par l'utilisateur, les situations ne peuvent pas évoluées sans son action sur la simulation. Ainsi un temps minimum de 50 unités temporelles a été choisi pour les différents scénarios. La simulation est arrêtée une fois l'ensemble des voyages terminé et une fois dépassée la durée de 50 unités temporelles.

L'ensemble des scénarios est ainsi effectué en modifiant les paramètres généraux et les paramètres de perturbation. Ainsi, un ensemble de 20 scénarios a été choisi afin d'observer l'influence de l'ensemble des paramètres de simulation sur les différents indicateurs. Ce tableau récapitulatif décrit l'ensemble des paramètres de départ et l'ensemble des perturbations déterminées par l'utilisateur :

	Paramètres				Processus	
Scénario	Nombre de ports	Nombre de cellules	% Cellules maritimes	Mode de gestion de la capacité	Perturbation	Temps de simulation

1	5	20	70	Attendre	Pas de perturbation	50
2	5	20	70	Attendre	Perturbation économique – Demande -25%	50
3	5	20	70	Attendre	Perturbation économique – Offre et demande -25%	50
4	5	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
5	5	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 20 cellules dont 15 sur réseau optimal	50
6	5	20	70	Attendre	Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 5	50
7	5	20	70	Attendre	Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 10	50
8	5	20	70	Attendre	Perturbation spatio-temporelle adaptative	50
9	5	10	70	Attendre	Pas de perturbation	50
10	5	30	70	Attendre	Pas de perturbation	50
11	5	10	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
12	5	30	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
13	3	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
14	3	20	70	Changer destination	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
15	5	20	70	Changer destination	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
16	10	20	70	Changer destination	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
17	10	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
18	5	20	60	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
19	5	20	50	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50
20	5	20	80	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	50

4.3 Résultats et analyse des réseaux obtenus

Pour réaliser les scénarios, des perturbations ont donc été placées arbitrairement par l'utilisateur que ce soit pour les perturbations spatiales ou les perturbations spatio-temporelles.

4.3.1 Visualisation des réseaux issus du système de simulation

L'ensemble des scénarios a permis d'obtenir les réseaux suivants (Fig. 67 à 84). Les scénarios 1,2,3 et 4 ont été réalisés sur le même réseau, du fait qu'aucun changement de paramètres n'est modifié entre les 4. Les informations relatives aux nœuds (volumes d'échanges des ports) et des liens (plus court chemin entre chaque paire de ports) sont indiqués sur les figures suivantes :

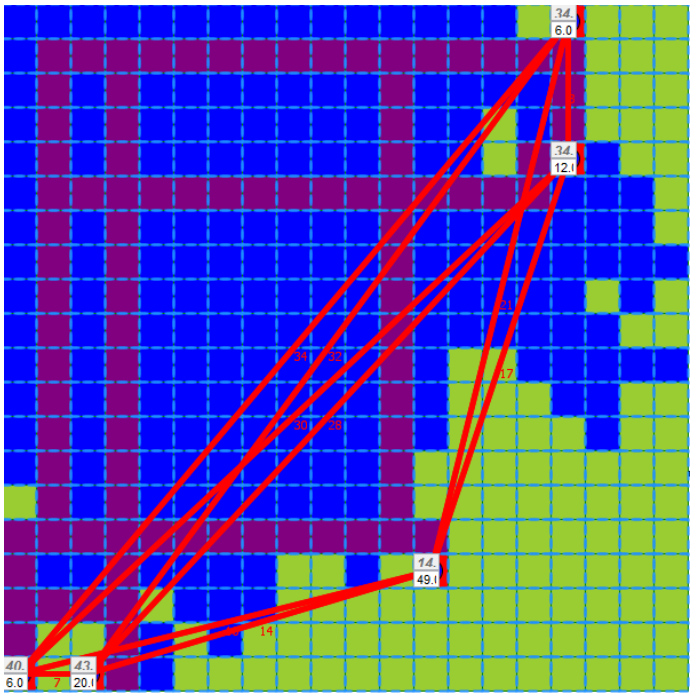


Figure 67. Scénario 1,2,3 – 5 ports/20*20 Cellules/70% Maritime / Attendre - Pas de perturbation spatiale

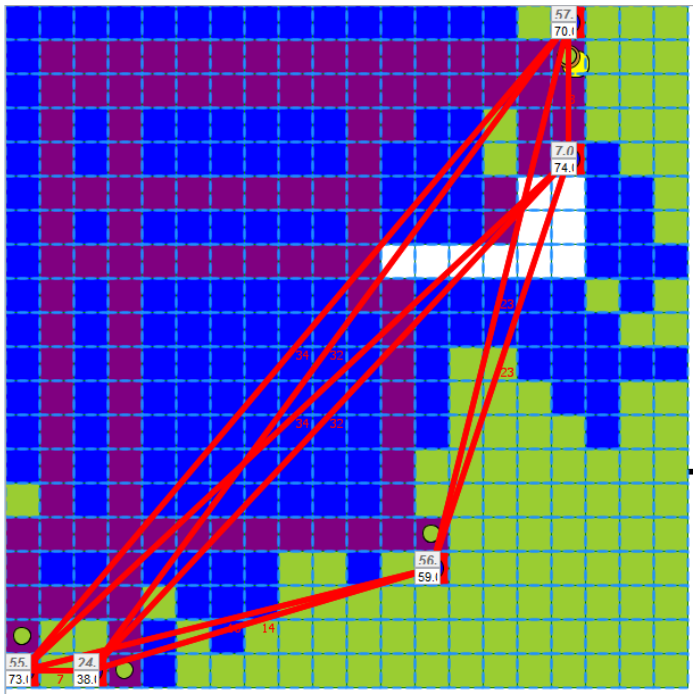


Figure 68. Scénario 4 – 5 ports/20*20 Cellules/70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

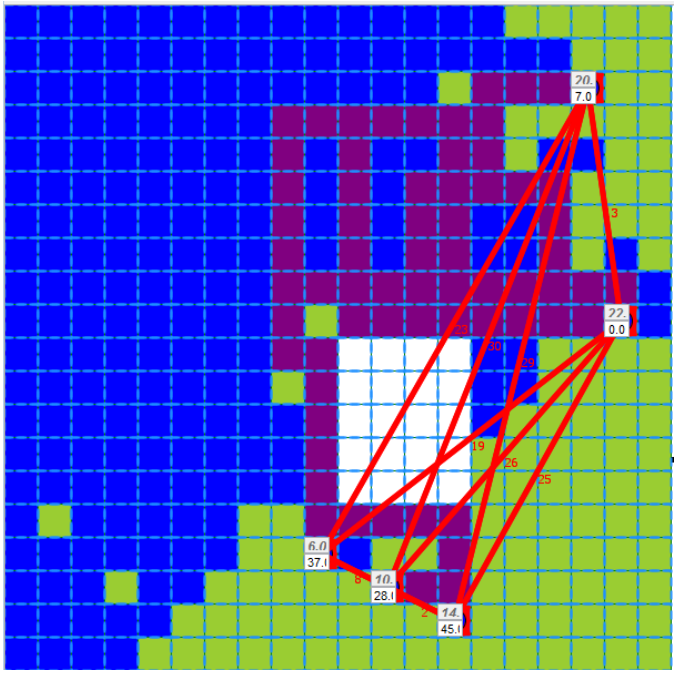


Figure 69. Scénario 5 – 5 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 20 cellules dont 15 sur réseau optimal

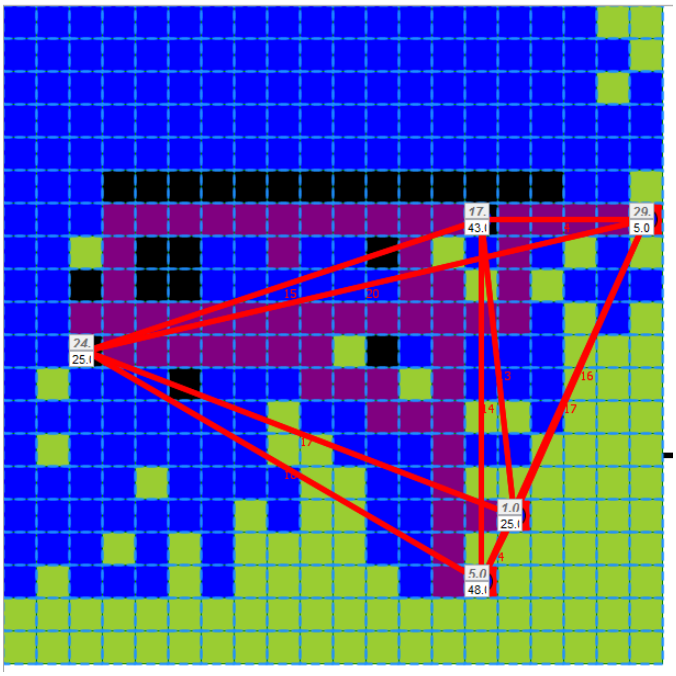


Figure 70. Scénario 6 – 5 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 2

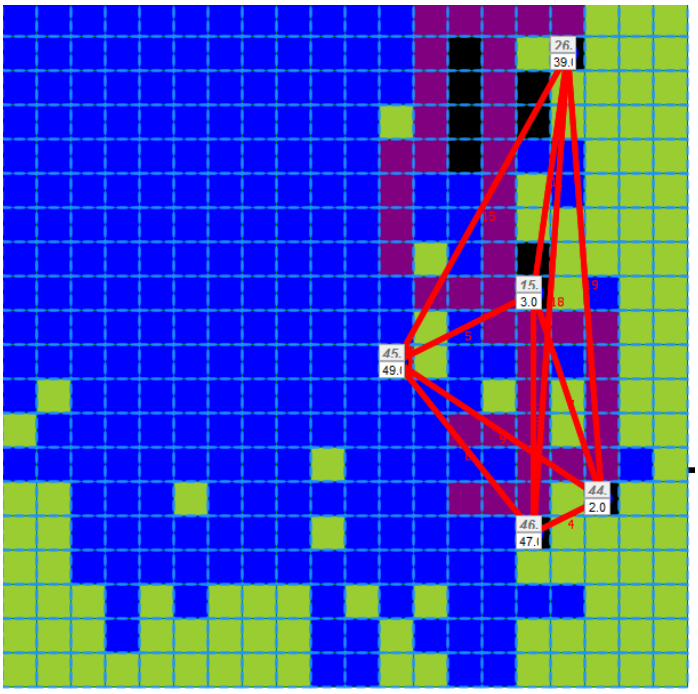


Figure 71. Scénario 7 – 5 ports / 20*20 Cellules /70% Maritime / Attendre - Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 5

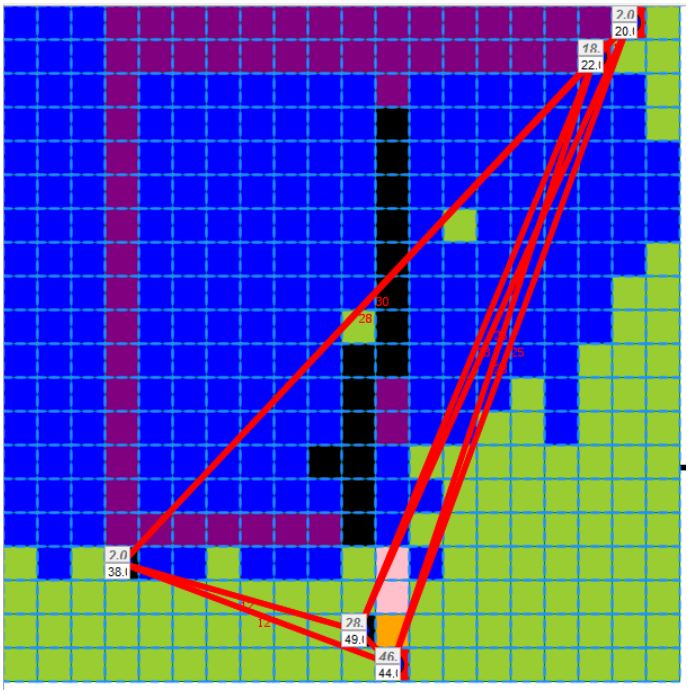


Figure 72. Scénario 8 – 5 ports / 20*20 Cellules /70% Maritime / Attendre - Perturbation spatio-temporelle adaptative

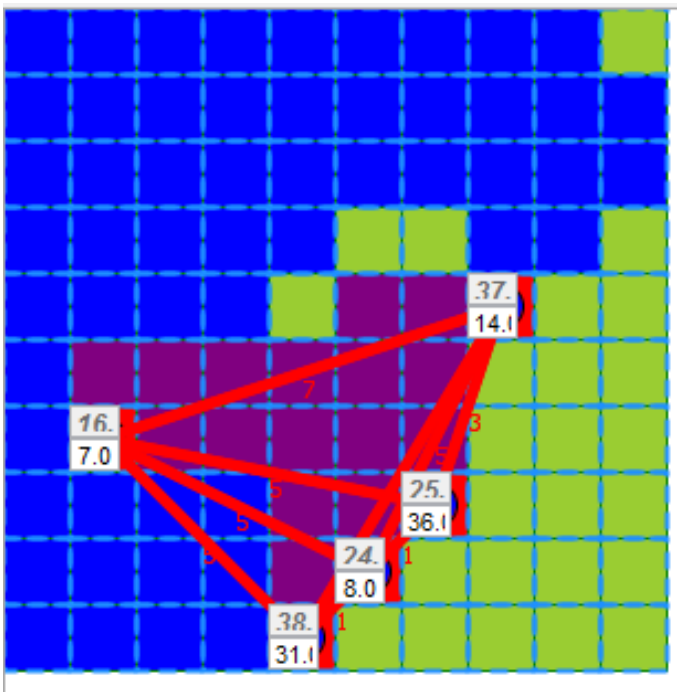


Figure 73. Scénario 9 – 5 ports / 10*10 Cellules /70% Maritime / Attendre - Pas de perturbation

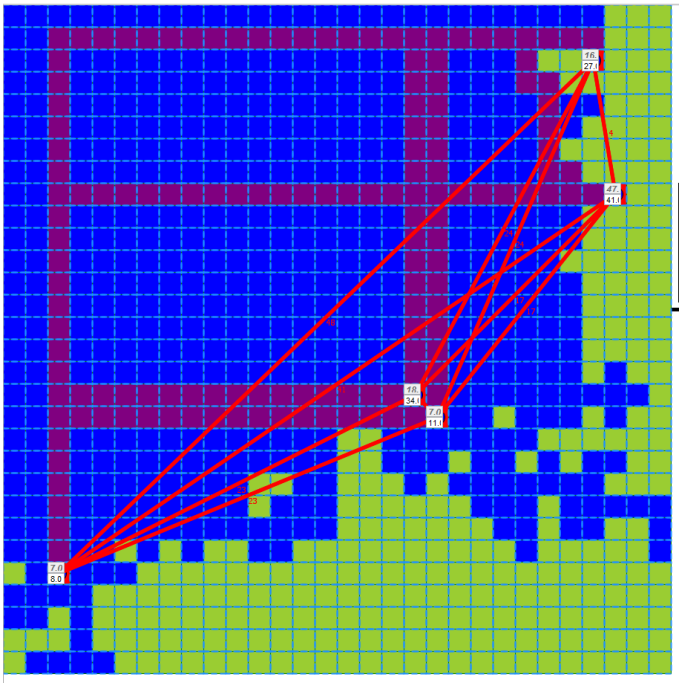


Figure 74. Scénario 10 – 5 ports / 30*30 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Pas de perturbation

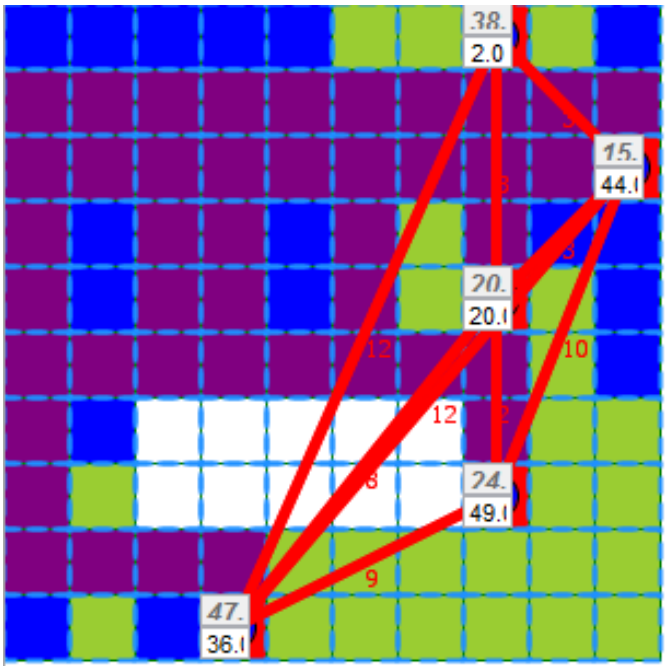


Figure 75. Scénario 11 – 5 ports / 10*10 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

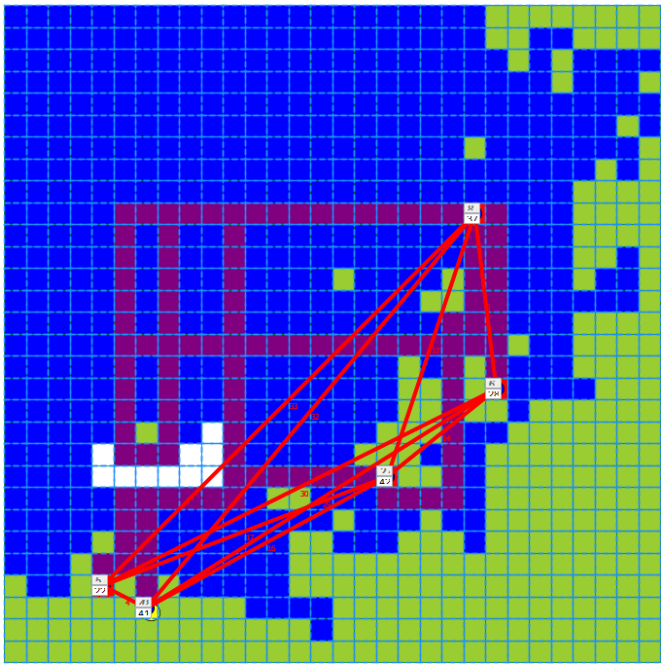


Figure 76. Scénario 12 – 5 ports / 30*30 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

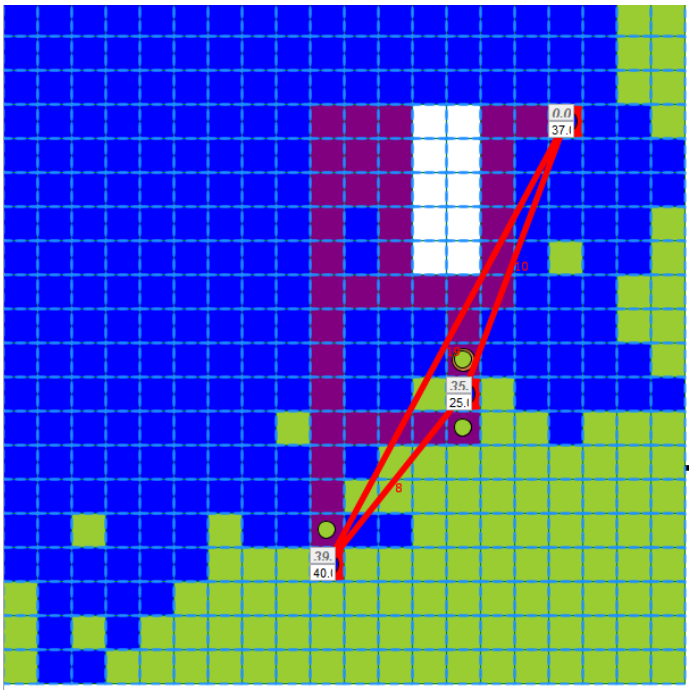


Figure 77. Scénario 13 – 3 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

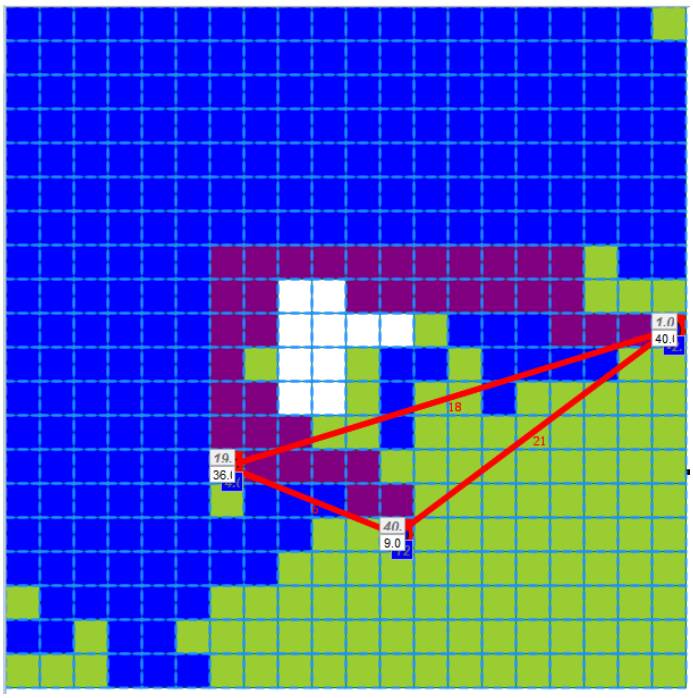


Figure 78. Scénario 14 – 3 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Changer - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

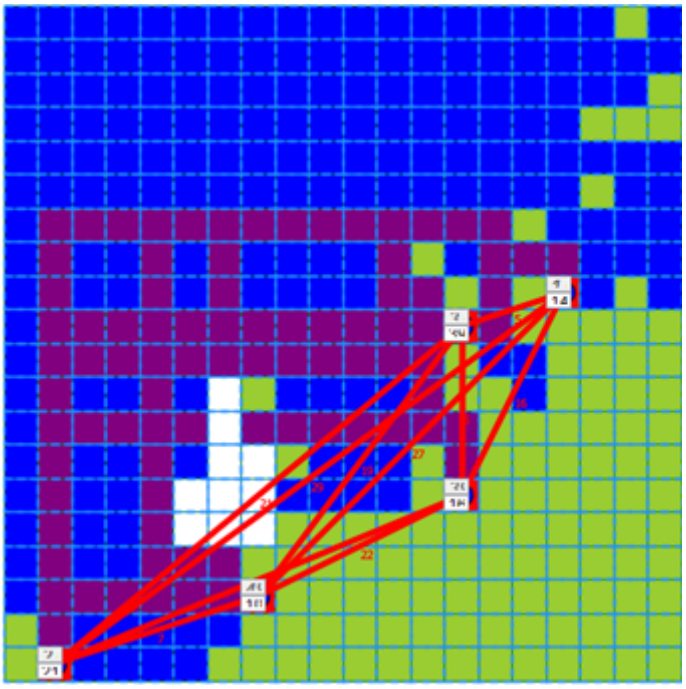


Figure 79. Scénario 15 – 5 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Changer - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

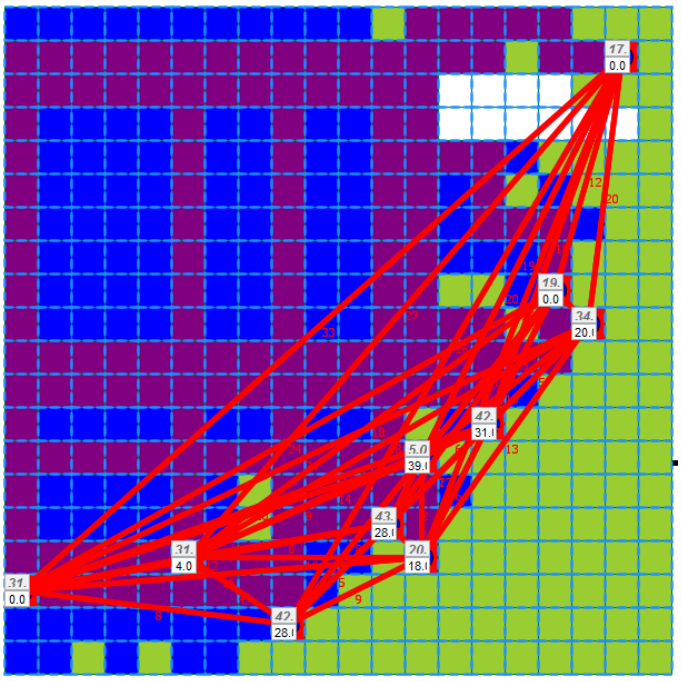


Figure 80. Scénario 16 – 10 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Changer - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

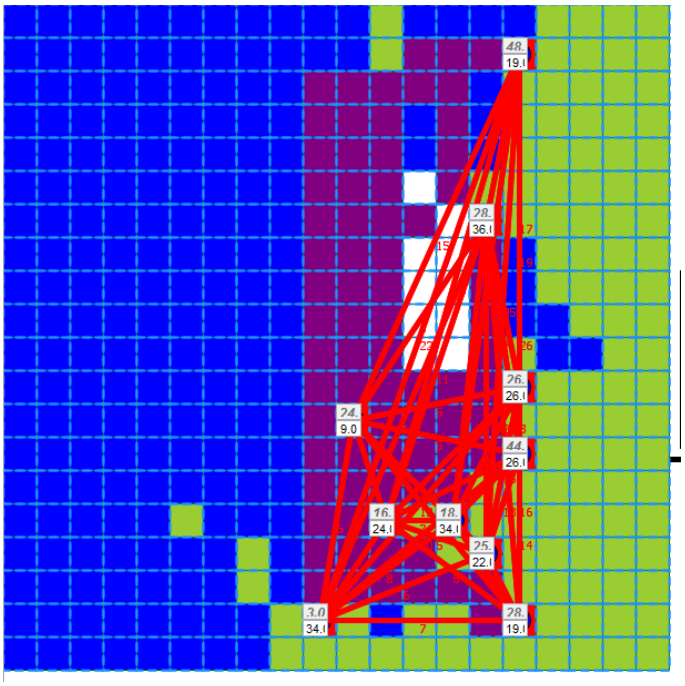


Figure 81. Scénario 17 – 10 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

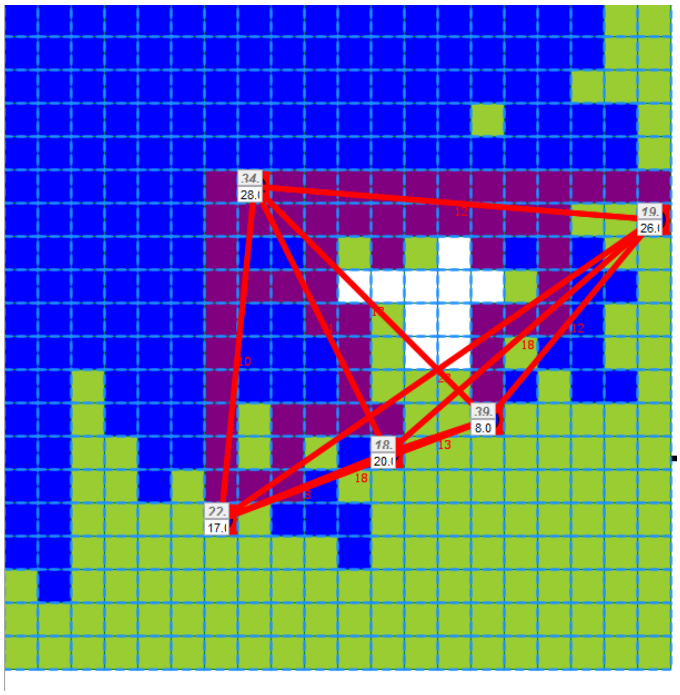


Figure 82. Scénario 18 – 5 ports / 20*20 Cellules / 60% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

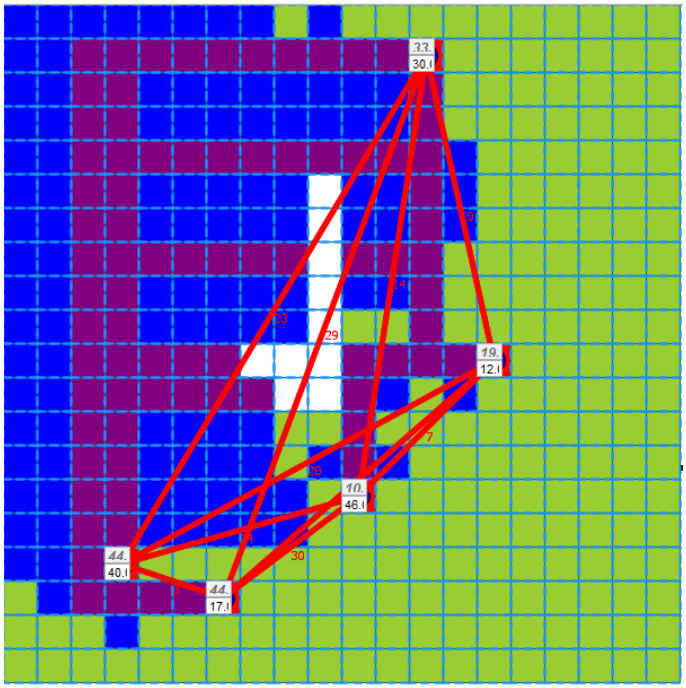


Figure 83. Scénario 19 – 5 ports / 20*20 Cellules / 50% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

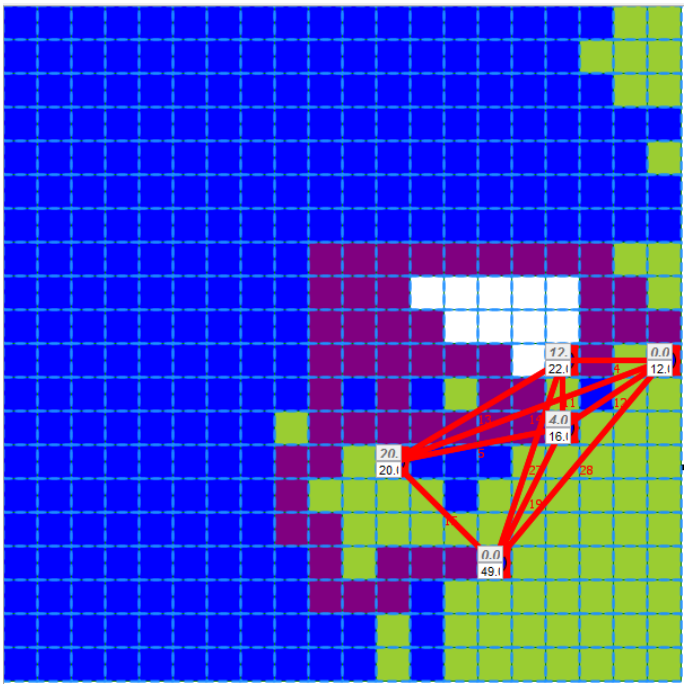


Figure 84. Scénario 20 – 5 ports / 20*20 Cellules / 80% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal

4.3.2 Evaluation de la vulnérabilité du réseau aux perturbations

L'ensemble des scénarios testés a deux objectifs : valider les différents indicateurs mis en place par la sensibilité des différents paramètres du modèle et évaluer la vulnérabilité d'un réseau dans un espace ouvert.

Le premier objectif permet d'illustrer le fonctionnement des indicateurs mis en place pour l'évaluation de la vulnérabilité pour constater comment ceux-ci évoluent en fonction des scénarios établis. Cela permet de savoir quelles informations chaque indicateur apporte pour l'évaluation de la vulnérabilité. Ainsi les scénarios permettent également de démontrer la pertinence des indicateurs proposés, et la sensibilité de chaque paramètre sur les résultats du modèle.

Le second objectif est l'évaluation du réseau. Les simulations étant réalisées sur un espace généré aléatoirement à partir de quelques règles de cohérence, il n'est pas possible de déduire des lois générales à partir des résultats obtenus. Ainsi, chaque simulation étant spécifique, le procédé par Monte-Carlo serait incohérent et méthodiquement incorrect. L'évaluation d'une perturbation se fait uniquement sur un réseau donné, face à une perturbation donnée. Chaque réseau et chaque perturbation étant unique, l'objectif du modèle est de démontrer, pour chaque cas de figure, comment se comporte un réseau aléatoire face à une perturbation aléatoire.

4.3.2.1 Identifier les centralités d'un réseau en espace ouvert (Indice 1)

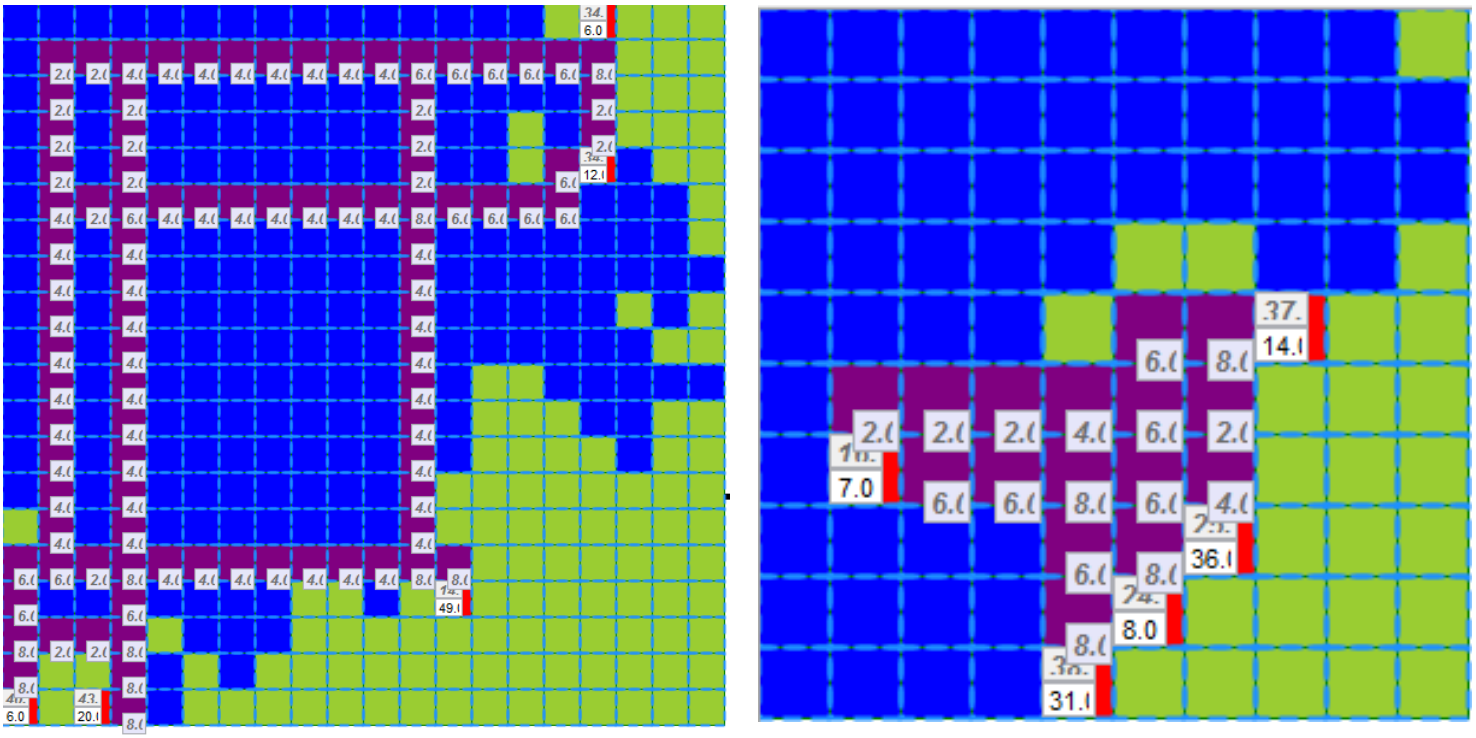


Figure 85. Intermédiarité des cellules dans le scénario 1 (à gauche) et scénario 9 (à droite)

Afin d'identifier dans l'espace maritime les espaces les plus stratégiques pour la navigation, l'indice 1 peut être utilisé (Fig. 85). Dans un graphe orienté, les voyages sont doublés (d'A vers B et de B vers A), ce qui explique que les intermédiarités sont toutes multiples de deux. Le niveau d'intermédiarité renseigne pour chaque cellule le nombre de plus court chemin transitant par la cellule. Sur les figures ci-dessus, l'indice est utilisé pour distinguer ces zones où les enjeux sont les plus forts. Ces zones sont situées dans les zones proches des ports, mais également dans des zones de croisements plus au large des cellules terrestres. Ces zones sont donc les espaces où les perturbations spatiales ou spatio-temporelles sont le plus susceptibles d'avoir un impact important sur la performance du réseau. Ainsi les deux informations qu'apporte cet indice sont :

- Les zones d'intermédiarité forte sont plus généralement à proximité des ports, puisque s'y rejoigne l'ensemble des plus courts chemins.
- Les contraintes spatiales à proximité des ports (cellules à 1, 2 ou 3 voisins maritimes) renforcent les niveaux d'intermédiarité. Dans les deux simulations, il est constaté que les ports ayant 4 voisins maritimes, ont des niveaux d'intermédiarité maximum de 6, contrairement aux ports « encastrés » ayant des intermédiarités maximums de 8.

4.3.2.2 Identifier les zones les plus fréquentées dans l'espace (Indice 2)

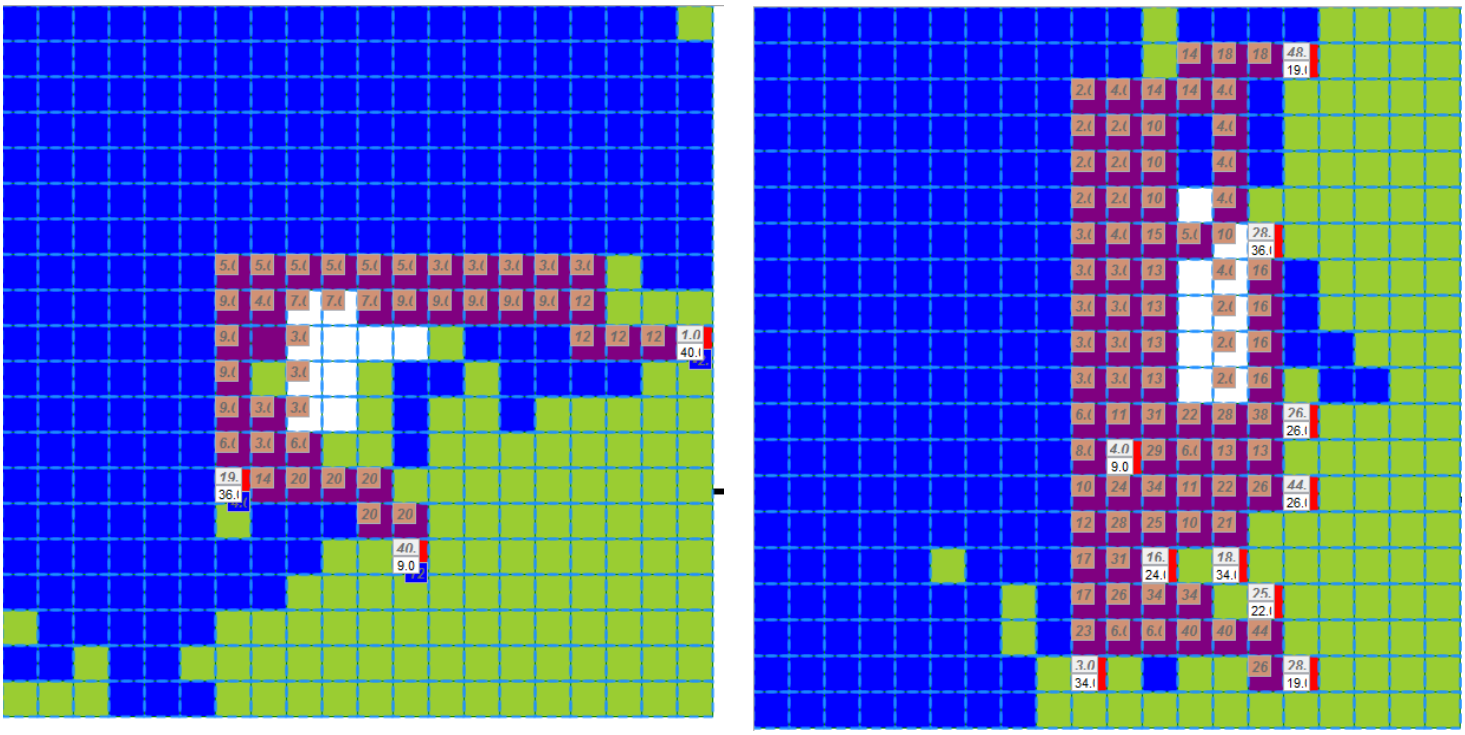


Figure 86. Fréquentation des cellules dans le scénario 14 (à gauche) et scénario 17 (à droite)

L'indice 2, la matrice des voyages, permet d'identifier les zones les plus fréquentées dans l'espace (Fig.86). L'ensemble des simulations montre une concentration accrue de voyages dans les zones à proximité des ports, là où les intermédiarités sont également les plus fortes. Ainsi les zones les plus contraintes par nombre de voisins sont susceptibles d'avoir un nombre de voyages plus important. Dans les deux exemples, la perturbation a été placée en cours de simulation, on peut ainsi distinguer les parcours, avant et après modification de la structure de l'espace. Ainsi l'indice 2 permet, par exemple, dans le cas d'ajout de nouvelles zones de perturbations (zones règlementées interdites au transport) de constater que :

- Les zones de navigation les plus importantes sont à proximités des zones de départs et d'arrivées, et sont renforcées par la densité des ports dans ces zones, qui correspondent aux zones où l'intermédiarité des cellules est la plus importante.
- Les détours sont effectués afin d'éviter les perturbations, ceux-ci occasionnent des modifications pour la sollicitation de l'espace, ils peuvent soit rejoindre un chemin déjà existant et le renforcer, soit créer de nouveaux chemins et agrandir l'espace des échanges dans l'espace de simulation.

4.3.2.3 Connaitre les routes les plus impactées par une perturbation donnée (Indice 3)

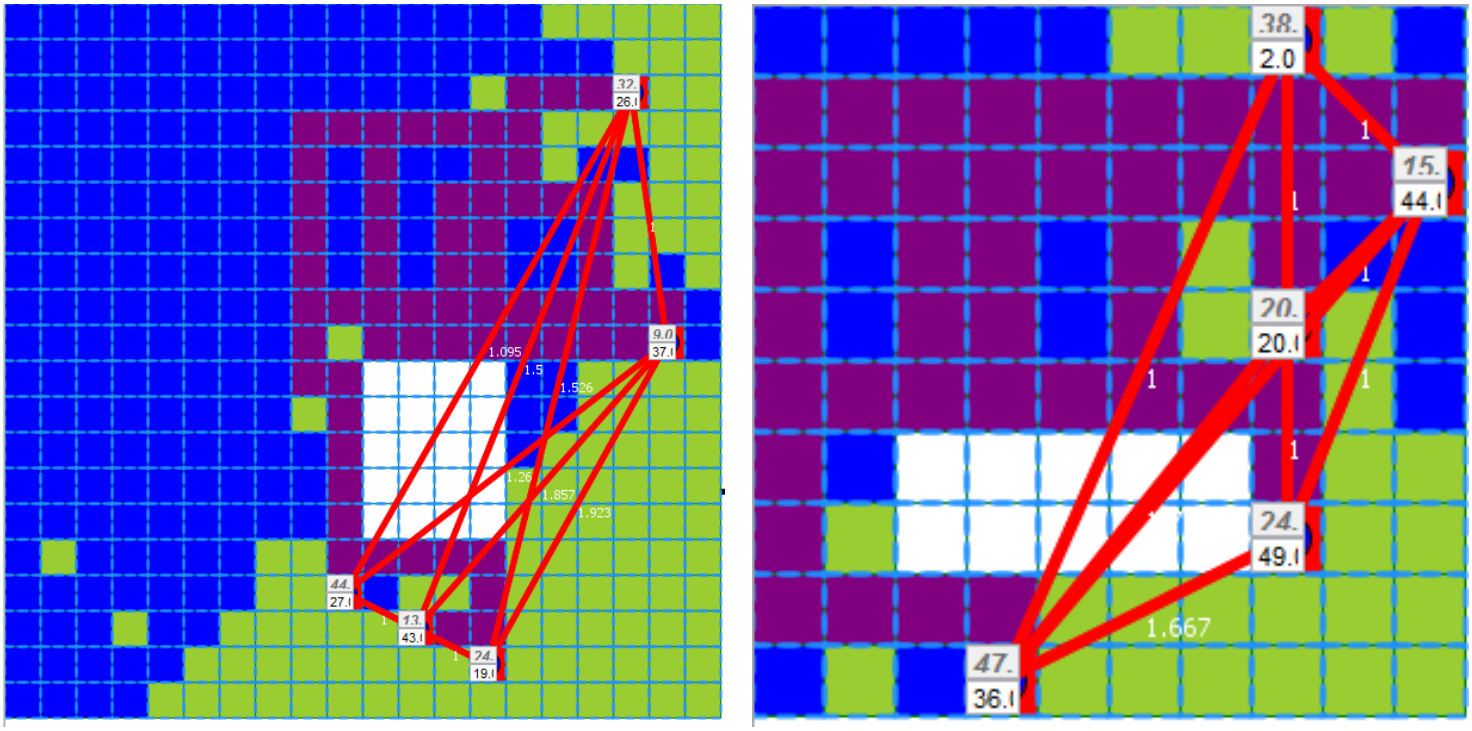


Figure 87. Impact des perturbations sur les routes dans le scénario 5 (à gauche) et scénario 11 (à droite)

L'indice 3 permet de mesurer la performance spatiale d'une route et ainsi renseigner sur la répercussion des pertes de performance sur les liens du réseau après une perturbation (Fig.87). En effet, les perturbations ont un impact global sur le réseau mais également local, sur les routes, et ces pertes d'efficacité ne sont pas égales en fonction des perturbations. Ainsi cet indice permet, dans un contexte de planification, de voir comment évoluent les pertes de performance en fonction de risques potentiels simulés, ou dans le cas d'un aménagement sur un réseau optimal. Dans l'exemple ci-dessus (Scénario 5), la perturbation spatiale a des répercutions différenciées selon les routes, de 1,923 (les navires utilisent une route 92,3% plus longue que la route optimale) à 1 pour les routes non impactées.

- Les routes maritimes les plus longues sont les plus susceptibles de connaître des déviations importantes face à une perturbation aléatoire.
- Les routes sont inégalement impactées en fonction de la localisation de la perturbation dans l'espace, certaines peuvent ainsi presque doubler en fonction de la taille, la forme et le positionnement de la perturbation.

- Une perturbation placée sur un espace d'échanges partagés entre plusieurs ports (intermédiarité élevée) impactera un nombre important de routes (6 routes impactées sur 10 dans le scénario 5), ce qui créera de nouvelles sollicitations importantes dans l'espace maritime.

4.3.2.4 Mesurer l'écart de sollicitation entre le réseau optimal et le réseau perturbé (Indice 4)

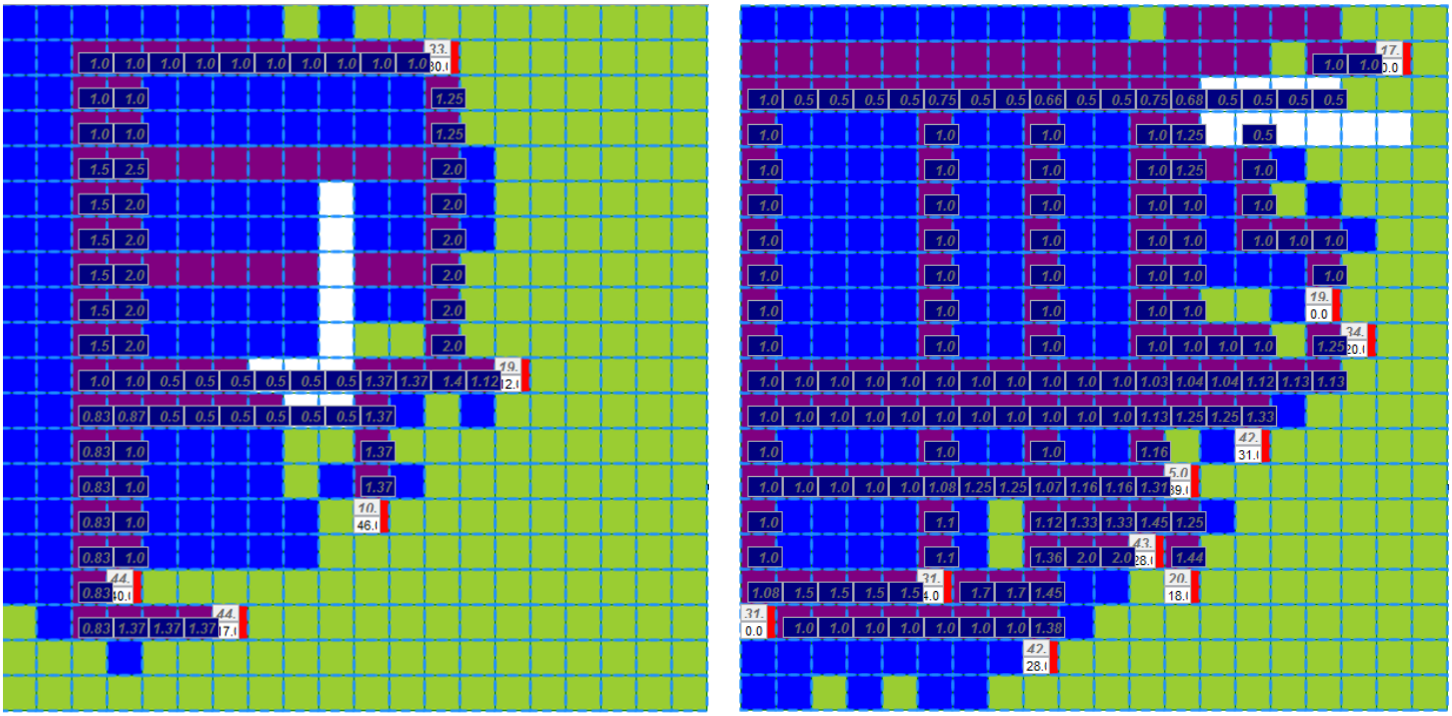


Figure 88. Rapport réseau perturbé/réseau optimal dans le scénario 19 (à gauche) et scénario 16 (à droite)

L'indice 4, le rapport usage/structure permet de comparer le nombre de passages enregistrés par l'indice 2, la matrice des voyages et le réseau optimal (Fig.88). Cela permet de visualiser et mesurer les reports d'utilisation de l'espace après une perturbation, et donc de mesurer les reports entre le réseau idéal et la simulation. Dans les deux exemples, des zones avec des valeurs inférieures à 1 sont constatées à côté des perturbations. Ces zones correspondent à l'ensemble de la zone de transport affectée par la perturbation. Sur le scénario 19, la perturbation est contournée par le nord, ce qui double l'utilisation du chemin utilisé pour la déviation (valeur de 2). Dans le scénario 16, l'ensemble de la ligne maritime au nord de l'espace de simulation est impacté. Sur les perturbations, des valeurs de 0,5 sont constatées. Deux possibilités émergent : les reports sont effectués soit sur le réseau optimal (scénario 19) et renforce en nombre de passages les routes existantes, soit sur une nouvelle zone de déviation liée à la perturbation (scénario 16) ce qui étend l'espace des échanges.

4.3.2.5 Observer la réorganisation du réseau dans un espace perturbé (Indice 5)

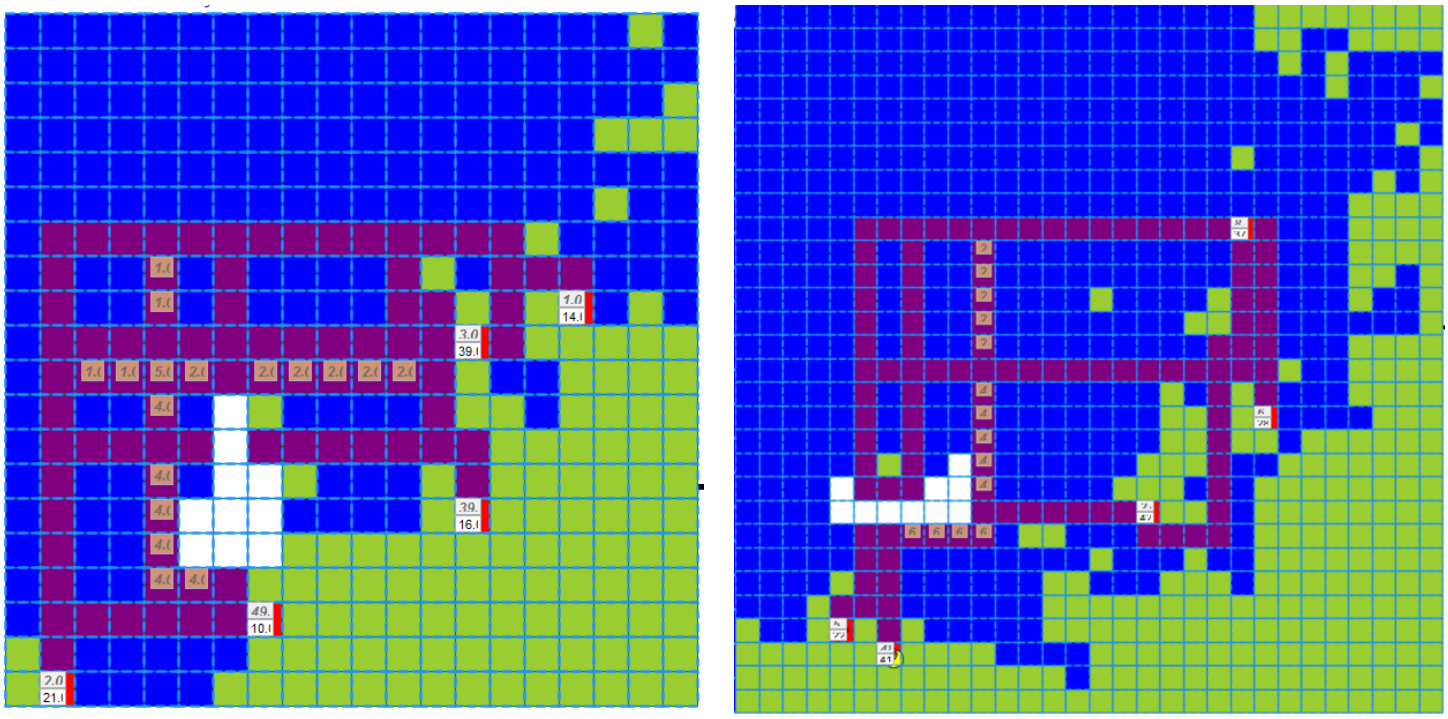


Figure 89. Cellules utilisées pour les déviations dans le scénario 15 (à gauche) et scénario 12 (à droite)

La matrice de déviation, indice 5, permet de faire apparaitre, à posteriori d'une perturbation, l'ensemble des déplacements qui ont été effectués dans l'espace de simulation en dehors des routes optimales calculées à priori entre chaque paire de ports (Fig.89). Cela permet de mettre en évidence la réutilisation de l'espace de navigation dans un espace perturbé. Dans les scénarios ci-dessus, la perturbation a fait apparaitre une déviation. Sur chaque cellule est affiché le nombre de passages. Cela permet d'analyser plus finement la répartition du trafic après perturbation. Dans le scénario 12, 6 voyages ont été effectués hors chemin optimal, dans le scénario 15, deux déviations formant une croix apparaissent. Le centre de cette croix étant la cellule dans laquelle a transité le plus de voyages déviés.

4.3.2.6 Connaitre à posteriori les impacts des perturbations en mer sur les ports (Indice 6)

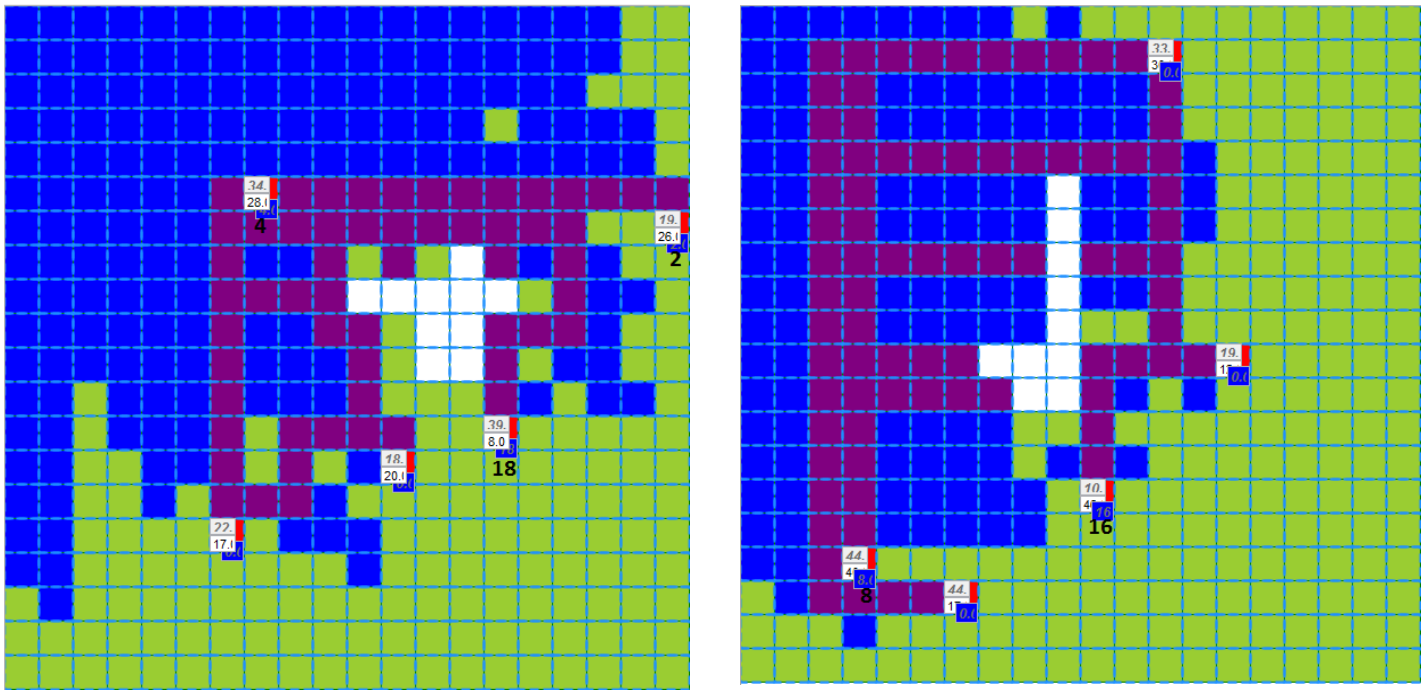


Figure 90. Retards des ports dans le scénario 18 (à gauche) et scénario 19 (à droite)

L'indice 6 permet de connaître, à posteriori d'une perturbation les impacts sur les ports de destination, qui accumulent les retards suite aux déviations produites dans l'espace de simulation (Fig.90). Ainsi les ports accumulent une valeur de retard (exprimée en unités temporelles) en sortie. Il est très difficile de faire un constat général sur la répartition de ces retards, puisque la donnée sur l'origine n'est pas connue. Cependant, les ports accumulant le plus de retard sont généralement les moins bien connectés au réseau, à savoir les ports ayant la somme des plus courts chemins la plus importante. C'est le cas dans le scénario 18 où le port le moins bien connecté accumule un retard de 18 unités temporelles. Dans le scénario 19 c'est un total de 16. Cependant on constate, dans toutes les simulations que certains ports, même peu connectés, n'accumulent aucun retard. A l'inverse, des ports très connectés accumulent également des retards (ici 4 et 8 unités temporelles). Ainsi, cet indicateur permet de constater que :

- Les ports ayant la connectivité la plus faible au reste du réseau ont des indices 6 plus importants que le reste des ports.
- Les ports ayant une connectivité plus forte peuvent cependant également être impactés, si l'origine du voyage est un port peu connecté ou directement impacté par une perturbation.

4.3.2.7 Evaluer la perte de performance globale du réseau maritime (Indices 7 et 8)

Scénario	*Perturbation*	*Indice 7*	*Indice 8*
1	Pas de perturbation	0	0
2	Perturbation économique – Demande -25%	0	0
3	Perturbation économique – Offre et demande -25%	0	0
4	Perturbation spatiale – 10 cellules donc 5 sur réseau optimal	32	16
5	Perturbation spatiale – 20 cellules donc 15 sur réseau optimal	80	42
6	Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 5	0	0
7	Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 10	0	0
8	Perturbation spatio-temporelle adaptative	0	0
9	Pas de perturbation	0	0
10	Pas de perturbation	0	0
11	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	116	36
12	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	0	0
13	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	4	4
14	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	22	14
15	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	24	8
16	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	22	22
17	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	26	0
18	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	24	24
19	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	48	24
20	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	164	6

Les indices 7 et 8 permettent d'évaluer les pertes de performance globale du réseau. L'indice 7 mesure en nombre de cellules, les pertes liées à la distance additionnelle des voyages et l'indice 8 les pertes de performance liée à la durée additionnelle des voyages. Plusieurs observations peuvent être faites ici, premièrement, l'indice 8 est toujours inférieur ou égal à l'indice 7. Cela s'explique par le fait que l'ETA de chaque navire est recalculé en fonction du plus court chemin lors de la création de chaque voyage, et donc répond dynamiquement aux modifications spatiales dans l'espace. Ensuite, les perturbations économiques et spatio-temporelles n'ont pas

eu d'impact sur la performance des réseaux. Les perturbations économiques ne produisent en effet aucune distance ou durée supplémentaire. Néanmoins leurs impacts sur le nombre de voyages générés dans l'espace de simulation ont été constatés dans les simulations 1 à 3. Les perturbations spatio-temporelles n'ont pas eu d'impact dans les simulations. En effet, celles-ci sont trop courtes pour avoir un impact significatif sur le réseau, et sont résilientes aux événements ponctuels. Les scénarios avec des perturbations statiques ont tous eu un impact significatif sur le réseau, à l'exception du scénario 12.

4.4 Analyse des scénarios par type de paramètre

Plusieurs scénarios ont été testés afin d'observer le comportement des différents paramètres sur les résultats de simulation. Ces paramètres, définis à l'initialisation mais également durant les simulations par l'utilisateur (caractéristiques des perturbations), permettent de constituer différents scénarios et tester la sensibilité de ceux-ci sur les résultats.

De cette manière, cette partie présente la relation entre les paramètres de simulation et les résultats obtenus. Chaque paramètre testé dans les simulations est analysé (type de perturbation, dimension de l'espace maritime, nombre de ports, dimension de la structure spatiale). Le mode de gestion de la capacité n'est ici pas abordé du fait que dans aucune simulation la capacité maximale des ports ou de l'espace n'a été atteinte.

4.4.1 Par type de perturbation

Parmi les 3 types de simulations proposées dans l'environnement de simulation, une seule catégorie a eu un impact sur la performance du réseau : les perturbations spatiales. Celles-ci étant perdurantes dans l'espace, elles affectent considérablement la performance du réseau en modifiant l'espace de simulation. Cependant, le scénario 4 a permis de montrer que le réseau peut s'adapter au mieux des nouvelles configurations spatiales. Cependant, si cette perturbation est trop importante, le réseau peut être considérablement impacté comme dans le cadre du scénario 5. Les scénarios 6 et 7 montrent des réseaux non-impactés par les pertes d'accessibilité temporaires dans l'espace. Dans le cadre du scénario 7, des déviations ont été pourtant enregistrées dans la matrice des déviations, cependant, il est possible que la perturbation dynamique n'ait pas affectée les plus courts chemins des navires ayant rencontrés la perturbation. Dans le cadre du scénario 6, la perturbation étant de taille très restreinte, le réseau n'a effectivement connu aucun impact. Enfin, l'impact des perturbations économiques ne peut être quantifié qu'avec l'indice 2. Sur un temps de simulation identique, le scénario 1 a généré

davantage de voyages que les scénarios 2 puis 3. Cela permet de déduire que les perturbations ont bien eu un effet sur le modèle gravitaire générant les voyages.

Scénario	Nombre de ports	Nombre de cellules	% Cellules maritimes	Mode de gestion de la capacité	Perturbation	I7	I8
2	5	20	70	Attendre	Perturbation économique – Demande -25%	0	0
3	5	20	70	Attendre	Perturbation économique – Offre et demande -25%	0	0
4	5	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	32	16
5	5	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	80	42
6	5	20	70	Attendre	Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 5	0	0
7	5	20	70	Attendre	Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 2	0	0
8	5	20	70	Attendre	Perturbation spatio-temporelle adaptative	0	0

4.4.2 Par la dimension de l'espace maritime

Plusieurs pourcentages de cellules maritimes dans l'espace ont été testés. Cependant, il est ici difficile de trouver une causalité puisque l'espace maritime le plus important (scénario 20 – 80% de cellules maritimes) a également été le plus impacté par la perturbation créée sur le réseau. En observant la forme de l'espace, et celle des perturbations créées, il est cependant possible de constater que dans le cadre du scénario 20, la perturbation a été placée sur des cellules à l'intermédiarité très forte contrairement aux scénarios 4, 18 et 19. L'intermédiarité explique ainsi davantage les pertes de performances que le pourcentage de cellules maritimes. Cependant, la réduction du pourcentage de cellules maritimes réduit considérablement les relations de voisinages dans la structure et accentue le nombre de cellules à intermédiarité forte et ainsi renforce l'enjeu sur des espaces plus vulnérables.

Scénario	Nombre de ports	Nombre de cellules	% Cellules maritimes	Mode de gestion de la capacité	Perturbation	I7	I8
19	5	20	50	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	48	24
18	5	20	60	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	24	24
4	5	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	32	16
20	5	20	80	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	164	6

4.4.3 Par nombre de ports

Les scénarios ont montré que le nombre de ports a des conséquences contrastées sur les résultats obtenus. Premièrement les réseaux avec 3 ports arrivent à gérer efficacement les pertes de performances de l'espace. En effet, l'exiguïté des réseaux (3 liens) a pour conséquence une gestion simple des perturbations et les déviations occasionnées sont facilement réalisées. Le réseau très simplifié gère simplement les perturbations occasionnées et optimise facilement les possibilités offertes par l'espace. Cependant, cette simplicité est également versatile, avec un enjeu plus important pour chaque route (une route correspond à 1/3 du réseau), une route fortement impactée impactera fortement l'ensemble du réseau. Les réseaux définis comme moyens (5 ports) ne dégagent pas de tendances particulières, en effet, ceux-ci ont été utilisés pour 16 des scénarios, il n'est donc pas possible de déduire une tendance forte. Enfin, les deux scénarios avec un grand nombre de ports (10 ports) ont eu pour conséquence deux résultats différents. Dans un cas, le scénario 17, les pertes de performance du réseau ont été relativement faibles, alors que dans le scénario 16, le réseau a été fortement impacté par les perturbations. Ainsi la taille du réseau n'est pas un paramètre déterminant, même s'il peut être explicatif.

Scénario	Nombre de ports	Nombre de cellules	% Cellules maritime	Mode de gestion de la capacité	Perturbation	I7	I8
13	3	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	4	4
14	3	20	70	Changer destination	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	22	14
4	5	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	32	16
15	5	20	70	Changer destination	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	24	8

17	10	20	70	Attendre	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	26	0
16	10	20	70	Changer destination	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	22	22

4.4.4 Par taille de la structure spatiale

Enfin, la dimension de la structure de l'espace est peut-être le critère le plus explicatif. En effet, les espaces très réduits (10*10) perdent plus facilement en accessibilité, une perturbation de 10 cellules correspondant à 10% de l'espace total. Ainsi il devient plus difficile de gérer les perturbations efficacement dans la mesure où les possibilités de déplacement pour le contourner sont plus réduites. Les espaces moyens ont des résultats contrastés en fonction de la simulation. Par contre, l'espace 30*30 a permis au réseau de gérer efficacement la perturbation. La principale interprétation de ce résultat est que l'espace propose suffisamment de relation de voisinages pour gérer la perturbation. De plus dans ce cas de figure, la perturbation ne représente plus qu'environ 1% de l'espace total, ce qui est trop faible pour être impacté et mesuré par les indicateurs.

4.4.5 Par niveau d'accessibilité à l'espace

Le niveau d'accessibilité peut être déduit des paramètres de simulation. L'ensemble des scénarios mis en place a pour but de mettre en évidence la vulnérabilité du réseau dans un environnement constamment modifié. La vulnérabilité du réseau face aux pertes d'accessibilité de l'espace peut être mesurée en tenant compte du niveau d'accessibilité.

L'ensemble des indicateurs précédant décrit la relation entre le réseau maritime et une ou plusieurs perturbations, entrainant une baisse de performance pour le réseau. Cependant, il est également nécessaire de comparer les pertes de performances du réseau avec les pertes d'accessibilité de l'espace.

En effet, le rapport entre espace et réseau n'est pas simple. Si une perturbation a un impact sur le réseau, il est intéressant de comparer à l'impact que celle-ci a sur l'espace en général. Cela permet de comparer l'impact des perturbations sur un réseau inscrit dans un espace et donc de déterminer si les pertes de performances du réseau sont une conséquence des pertes d'accessibilité provoquées par les perturbations.

Scénario	Perturbation	i7	i8	% Accessi-bilité	% Cellules maritimes
1	Pas de perturbation	0	0	70	70
2	Perturbation économique – Demande -25%	0	0	70	70
3	Perturbation économique – Offre et demande -25%	0	0	70	70
4	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	32	16	67,5	70
5	Perturbation spatiale – 20 cellules dont 15 sur réseau optimal	80	42	65	70
6	Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 2	0	0	79,35	70
7	Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 5	0	0	77,95	70
8	Perturbation spatio-temporelle adaptative	0	0	70	70
9	Pas de perturbation	0	0	70	70
10	Pas de perturbation	0	0	70	70
11	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	116	36	60	70
12	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	0	0	67,5	70
13	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	4	4	67,5	70
14	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	22	14	67,5	70
15	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	24	8	67,5	70
16	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	22	22	67,5	70
17	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	26	0	67,5	70
18	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	24	24	57,5	60
19	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	48	24	47,5	50
20	Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal	164	6	77,5	80

Les pertes de performances spatiales et temporelles du réseau doivent être comparées à la perte de performance de la structure spatiale. Sans cela, il n'est pas possible de distinguer la perte de performance du réseau de la perte de performance de l'espace. Cette distinction permet alors d'estimer pour une perturbation donnée la part de baisse de performance imputable aux pertes d'accessibilité.

Ces pertes d'accessibilités ont été estimées par le rapport niveau d'accessibilité/% de cellules maritimes. Celles-ci ont été comparées à l'indice de coût additionnel lié à la distance (indice 7) avec un coût de 1, soit la perte de performance liée aux cellules supplémentaires pour réaliser les voyages sur le réseau (Fig.91) :

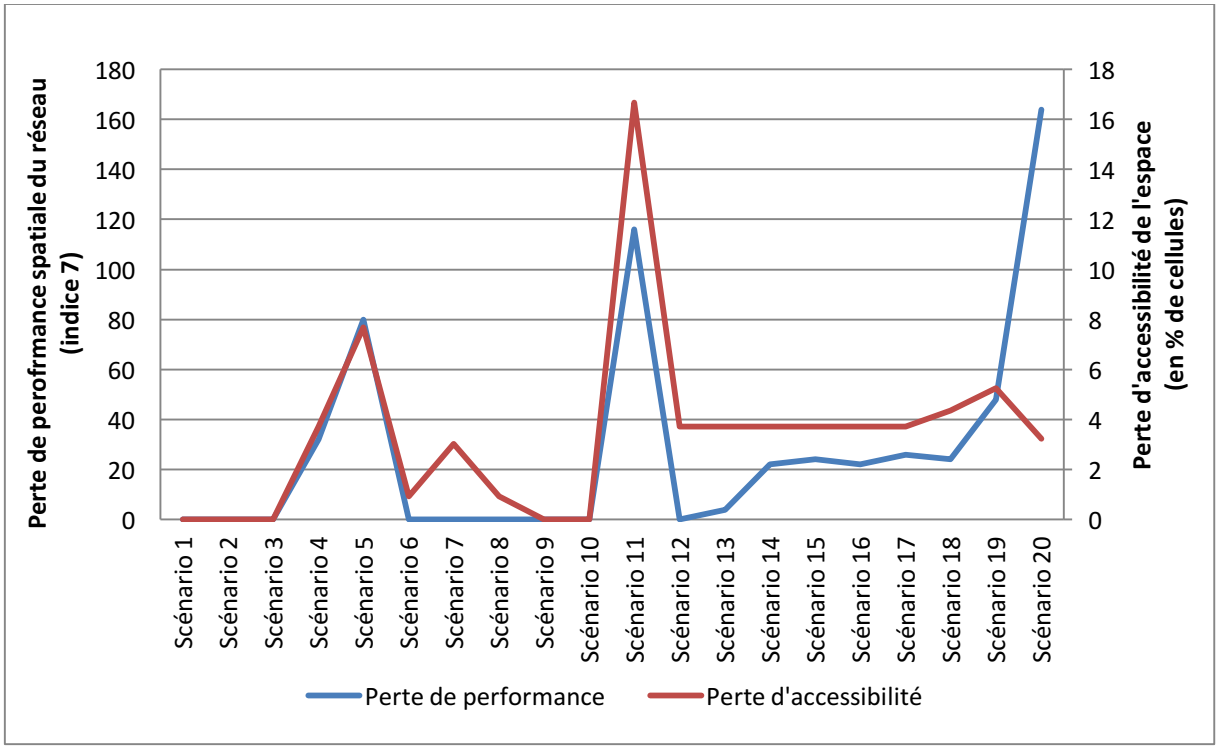


Figure 91. Rapport perte de performance/perte d'accessibilité dans les scénarios de simulation

Ainsi plusieurs éléments peuvent ici être constatés. Premièrement, aucune perte de performance n'est enregistrée lorsque qu'aucune perte d'accessibilité n'est recensée. Deuxièmement, certains scénarios ont rencontré des pertes d'accessibilité, mais aucune perte de performance. C'est le cas des scénarios avec perturbations spatio-temporelles, mais également le scénario 12, dont 5 cellules perturbées ont été placées sur le chemin optimal. Troisièmement, des scénarios ayant une perte d'accessibilité de même valeur (4, 12, 13, 14, 15, 16, 17) à savoir une baisse de 3,7% ; ont des pertes de performances différentes en fonction des scénarios de simulation. Enfin, les pertes de performance spatiale du réseau et les pertes d'accessibilité de l'espace ont un coefficient de corrélation de 0,63 signifiant que performance et accessibilité sont corrélées, même si d'autres paramètres interviennent sur la performance du réseau.

Deux scénarios ont cependant obtenu des résultats très différents : les scénarios 12 et 20. En effet, sans ces scénarios, la corrélation des 18 autres cas est de 0,94, signifiant une corrélation forte. Ces deux cas vont ainsi être analysés pour comprendre un tel écart avec les autres.

Le scénario 12 n'enregistre aucune perte de performance, malgré une baisse de l'accessibilité de 3,7%. Pourtant la matrice des déviations montre clairement des voyages déviés. Il est même possible de déduire que 6 voyages ont été effectués par les navires sur ces routes déviées (Fig. 92).

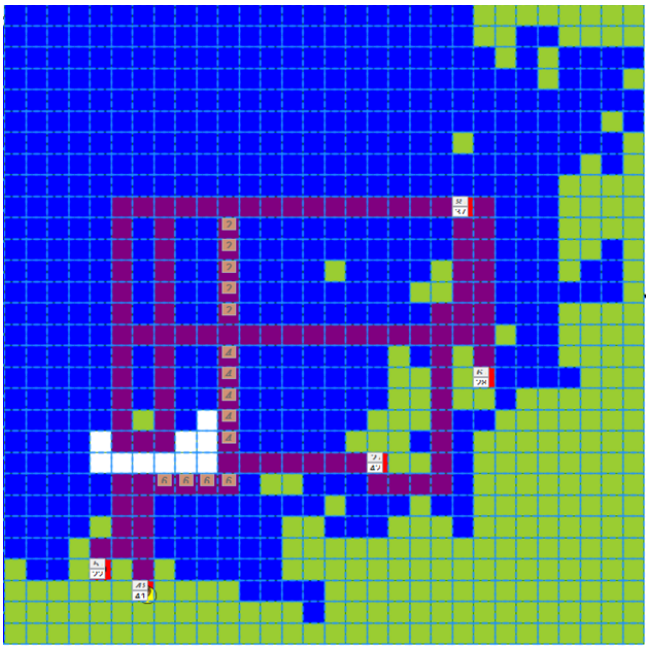


Figure 92. Déviation des routes maritimes dans le scénario 12

La raison pour laquelle aucune perte de performance n'est enregistrée est dans ce cas précis est liée à la métrique. En effet, en distance de Van Neumann, plusieurs courts chemins de distance équivalente peuvent exister. Aucune distance ni durée supplémentaire est à effectuer pour les navires sur le réseau, malgré la baisse d'accessibilité affectant le réseau optimal.

Dans le cas du scénario 20, une perte de performance conséquente (164 cellules supplémentaires) est mesurée sur l'ensemble du réseau, malgré une perte d'accessibilité relativement faible face aux répercussions sur le réseau. Plusieurs éléments peuvent ici être décrits pour comprendre cette valeur. Premièrement, la perturbation a été placée sur une zone d'intermédiarité très forte (Fig. 93)

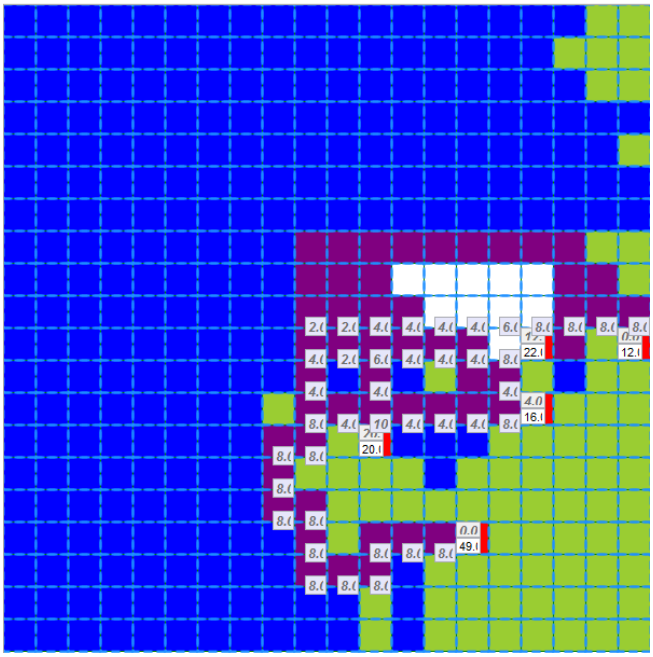


Figure 93. Intermédiarité des cellules dans le scénario 20

En effet, la perturbation a été placée à proximité d'un port et bloque deux voisins possibles à celui-ci. Deuxièmement, les 5 cellules perturbées non placées sur le réseau optimal occupent l'espace de la plus courte déviation possible. Cela signifie que la trajectoire finalement utilisée pour les voyages prolonge davantage la déviation. Cela revient alors à avoir les 10 cellules de la perturbation affectant le réseau optimal. Ainsi, le plus court chemin entre le port touché par la perturbation et le port 2 cellules plus bas, passe de 4 déplacements à 20 déplacements nécessaires pour réaliser le voyage, soit une augmentation de 400% du chemin initial. C'est donc la configuration même de l'espace et de la perturbation qui explique la forte baisse de performance de ce scénario. Ainsi la relation entre accessibilité et performance doit être étudiée en fonction des configurations de l'espace.

4.5 Discussion et voies d'amélioration de la plateforme

Du fait de la complexité des situations (espaces aléatoires, paramètres divers) il reste cependant difficile de distinguer des règles générales quant à la vulnérabilité du réseau face aux perturbations. Le principal résultat de ces scénarios reste cependant, que face aux multiplicités des réseaux obtenus, la simulation parait nécessaire pour évaluer chaque cas de figure. Les scénarios ont fourni des exemples et des contre exemples pour chaque paramètre. Pour cela, il serait nécessaire de pouvoir importer ses propres espaces d'intérêt afin de les évaluer, afin de tester si l'outil est assez riche pour fournir aux décideurs et planificateurs un panel d'indicateurs permettant d'évaluer pour chaque cas de figure la vulnérabilité du réseau.

4.5.1 Améliorations

Plusieurs améliorations serait nécessaires afin d'évaluer et permettre à l'outil de fournir aux décideurs et planificateurs un panel d'indicateurs permettant d'évaluer pour chaque cas de figure la vulnérabilité du réseau.

4.5.1.1 Différentiation des agents

La plateforme permet grâce au paradigme agent d'étudier la relation existante entre deux agents : les agents mobiles, à savoir les navires, et l'espace, modélisé au travers d'un ensemble de cellules. Cependant si cette relation a été suffisante pour le sujet de l'étude, il serait possible de l'enrichir au travers une différenciation des agents. Par différenciation, il faut entendre des rôles différenciés entre les navires. Cela pourrait être utile, notamment pour ce qui concerne les risques de piraterie et de terrorisme. En effet, les perturbations spatio-temporelles adaptatives, bien que fonctionnelles, pourrait être remplacées par des navires « hostiles » et des navires « sécurité » permettant de modéliser ce type de perturbation par le paradigme multi-agents. De tels systèmes existent pour la piraterie maritime (Jakob *et al.*, 2011) et pourraient enrichir la plate-forme par la modélisation des perturbations.

4.5.1.2 Différentiation des cellules maritimes

La modélisation de l'espace a été effectuée via un espace discrétisé mais la grille obtenus n'a été utilisée que pour la modélisation des perturbations. Cependant, il existe dans l'espace maritime plusieurs types d'objets qui pourraient être modélisés et pris en compte dans l'espace de simulation. Les DST pourraient être modélisées comme des passages obligatoires entre les ports renforçant le lien complexe entre les navires et l'espace maritime. Cela passerait par une différenciation des perturbations, ayant une pondération propre en fonction des groupes d'objets. L'utilisation du catalogue S-57 pourrait être intégrée et permettrait de tester de nouveaux scénarios de simulation et accroitre la pertinence du modèle en tant qu'outil réaliste pour l'aide à la planification de transport maritime.

4.5.1.3 Importer des structures spatiales existantes

Afin de tester les différents scénarios et indicateurs mis en place, des espaces aléatoires sont générés pour chaque simulation. Cependant, ajouter un module permettant de construire ou importer un espace maritime déjà existant serait indispensable pour simuler des espaces et des situations réelles.

4.5.1.4 Créer une grille adaptative avec un quadtree

Si la grille a permis de discrétiser l'espace maritime, il serait intéressant de pouvoir transformer cette grille en quadtree, afin de pouvoir simuler à différentes échelles le réseau maritime. De surcroit, il existe une grande différence d'activité entre la haute mer et les zones côtières, un quadtree serait alors utile afin de subdiviser les portions de l'espace où l'activité et les objets maritimes sont les plus denses. Cela pourrait être à terme un espace adaptatif à l'activité maritime. Cependant, cela pose d'autres problèmes à prendre en compte dans le modèle comme le voisinage irrégulier d'un quadtree dynamique.

4.5.2 Apport de la démarche

Un modèle de simulation des espaces maritimes a été proposé, et celui-ci a été implémenté dans AnyLogic. Le modèle a été mis en place afin de pouvoir évaluer la vulnérabilité du réseau maritime. Celui-ci contribue à divers apports pour la gestion des risques maritimes et la géographie des transports.

4.5.2.1 Apport à la planification des espaces maritimes

Cette plateforme permet de répondre aux différents objectifs liés à la planification des espaces maritimes. En effet nous avons distingué 6 objectifs qui peuvent être atteint par l'utilisation de l'outil. Les indicateurs mis en place peuvent alors être utilisés pour améliorer les diverses situations à risque et évolutions que peuvent rencontrer le réseau maritime. Celui-ci a également démontré le lien complexe existant entre l'accessibilité à l'espace et la performance du réseau.

4.5.2.2 Apport à la modélisation des réseaux maritimes

Ce travail apporte une démarche permettant de générer le réseau à partir des trajectoires et ainsi permettre de formaliser les réseaux non pas par des relations entre les ports, mais entre la relation entre les ports et l'espace maritime. Cela permet ainsi d'intégrer les risques spatiaux, liés aux territoires maritimes et leurs dynamiques au travers la géométrisation des liens du réseau. A partir d'un réseau relationnel, cela permet d'obtenir un graphe spatial correspondant à la longueur moyenne de chaque route. Même si ces pertes de performance liées aux dynamiques maritimes sont minimes face à d'autres risques, comme la fermeture de ports ou de raffineries (Zavitsas, 2011) ou encore de checkpoints (canaux, détroits) (Rodrigue, 2013). Cela apporte une nouvelle formalisation du réseau maritime, incluant une pondération des liens et apportant une analyse plus fine de la vulnérabilité du réseau maritime.

Conclusion du chapitre 4

Un système de simulation pour l'évaluation de la vulnérabilité de l'espace maritime a été implémenté et testé dans le cadre de la planification de l'espace maritime. A chaque indicateur a été assigné un objectif pour apporter des connaissances sur l'évolution du réseau maritime dans un espace perturbé. Ainsi le système de simulation permet d'identifier les centralités d'un réseau en espace ouvert et les zones les plus fréquentées dans l'espace, de connaitre les routes les plus impactées à une perturbation donnée, de mesurer l'écart de sollicitation entre le réseau optimal et le réseau simulé, d'observer la réorganisation du réseau dans un espace perturbé, de connaitre à posteriori les impacts des perturbations sur les ports et enfin d'évaluer la perte de performance globale du réseau maritime.

Une liste de scénarios a été établie en fonction des différents paramètres du système, parmi lesquels, le type de perturbation, la taille de la structure spatiale, le nombre de ports, la gestion de la capacité, le temps de simulation et le pourcentage de cellules maritimes. Au total, 20 scénarios ont été mis en place puis testés dans le système de simulation.

Les indicateurs ont montré qu'ils apportaient plusieurs informations utiles pour l'évaluation de la vulnérabilité. Ainsi, les zones de fortes centralités sont généralement les plus sensibles au risque, se situant proches des ports, et les ports les moins connectés sont généralement les plus vulnérables à une perturbation placée arbitrairement dans l'espace. Chaque scénario ayant sa configuration propre, l'ensemble des indicateurs sont adaptés pour appréhender chaque configuration et apporter des connaissances sur la vulnérabilité du réseau maritime.

Une analyse des paramètres a été faite ainsi qu'une analyse sur les pertes d'accessibilité de l'espace et les pertes de performance du réseau maritime. Les résultats montrent une corrélation entre les deux, même s'ils varient fortement en fonction de la configuration de l'espace de simulation. Ainsi cela valide à posteriori l'usage de simulation pour évaluer différentes configurations du réseau et de l'espace, et démontre que le rapport entre accessibilité et performance des réseaux est complexe, et que celui-ci peut être évalué au travers les indicateurs proposés.

Des axes d'amélioration ont été proposés afin de renforcer le système de simulation. Parmi ceux-ci, la possibilité de différencier le rôle des agents, de créer une grille adaptative avec un quadtree, d'intégrer des données liées au territoire maritime où l'importation dans le système d'espace réel a été proposé. Certaines de ces améliorations pourraient être facilement réalisées, d'autres sont plus complexes et nécessitent plus de temps.

Conclusion

Cette thèse avait pour objectif de fournir une évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime. Ainsi, ce travail a deux composantes importantes : d'un côté la modélisation de l'espace et du réseau maritime, et de l'autre la simulation du réseau comme méthode d'évaluation de la vulnérabilité. Ce travail a ainsi permis d'évaluer, avec les propriétés topologiques et géométriques, la vulnérabilité du réseau en tant que réseau spatialement inscrit dans un espace ouvert.

Bilan de la thèse

Le premier chapitre a permis de faire le lien entre les risques maritimes et la vulnérabilité du réseau, avec les notions d'accessibilité et de performance. Les risques maritimes ont été présentés puis la notion de perturbation a permis de faire le lien entre ces risques et les pertes de performance du réseau. Ce réseau étant défini uniquement de manière topologique (les ports), mesurer l'impact de ces perturbations demandait alors une approche spécifique pour évaluer les risques en mer.

Le deuxième chapitre a permis de décrire les éléments utilisés pour la méthode de modélisation spatiale du réseau et de l'espace maritime. Le premier ayant été modélisé avec un graphe spatial, les nœuds représentant l'emplacement des ports et les liens les déplacements entre ceux-ci. Ces liens sont alors pondérés par la distance moyenne empruntée par les navires, ce qui permet d'obtenir une longueur spatiale et temporelle entre les ports. Plusieurs mesures ont ensuite été proposées pour mesurer les propriétés spatiales du graphe. L'espace a été modélisé en utilisant une structure topologique régulière, à savoir une grille, afin de pouvoir mesurer les distances entre les ports. Ensuite le paradigme multi-agents a été étudié comme méthode pour l'évaluation des déplacements des navires face aux modifications de l'espace maritime liées aux perturbations.

Le troisième chapitre a permis de proposer un système de simulation pour l'évaluation de la vulnérabilité du réseau maritime. Celui-ci repose sur la simulation à base d'agents avec les navires comme agent et l'utilisateur comme déclencheur des perturbations. Le système modélisé avait pour objectif de mesurer et quantifier ces interactions. Pour ce faire, plusieurs choix de modélisation ont été faits, la simulation à base d'agents d'une part, et une structure spatiale régulière de l'autre. Ce système a ensuite été décrit par le protocole ODD puis modélisé à partir de l'AML et l'UML. Des indicateurs spécifiques pour le système de simulation ont été proposés, adaptés et des indicateurs utilisés pour les réseaux d'infrastructures. Enfin, ce modèle

a été implémenté sur AnyLogic, plateforme de modélisation et simulation, qui permet notamment la modélisation des systèmes multi-agents.

La quatrième partie a permis de tester ce modèle et d'évaluer la vulnérabilité du réseau à une perturbation par sa perte de performance suite à des perturbations. Plusieurs scénarios ont été établis en fonction des perturbations créées par l'utilisateur et les différents paramètres du modèle. Par des scénarios établis, des exemples d'utilisation des indicateurs ont été décrits et une analyse des différents paramètres a été produite. Enfin, une analyse sur la relation entre les pertes d'accessibilité et les pertes de performance a été effectuée, et une corrélation entre les deux a été démontrée. Cependant, les configurations de l'espace et du réseau suggèrent qu'il est nécessaire d'évaluer pour chaque configuration la vulnérabilité du réseau aux perturbations.

Perspectives

Ce travail apporte premièrement des perspectives pour la modélisation des réseaux ouverts et leur évaluation aux perturbations. En effet, celui-ci est adaptable aux réseaux aériens ou aux déplacements de piétons, en fonction des différentes spécificités de ceux-ci. Il présente également des opportunités quant à la prospective pour la planification territoriale. En effet, la directive européenne INSPIRE met en évidence le manque de systèmes d'aide à la décision mis en place pour appréhender les changements qu'impliquent et impliqueront la planification des espaces maritimes en Europe. Ainsi le système de simulation mis en place pourrait être amélioré afin de fournir un système opérationnel pour l'aide à la décision.

Table des figures

Figure 1. Organisation d'un réseau en hub (en rouge) et spoke (en bleu).....27
Figure 2. Planisphère déformé présentant la connexité de l'Océan Mondial (Serret, 2009).....28
Figure 3. Relation Coût/Distance des différents modes de transport (Rodrigue *et al.*, 2013)..30
Figure 4. Indicateurs pour la mesure de performance du réseau maritime (Itoh, Merk et Ducruet, 2014).....33
Figure 5. Différence entre gestion, évaluation et analyse des risques (d'après Rausand, 2011).....37
Figure 6. Relations entre les différents concepts relatifs au risque des réseaux.....47
Figure 7. Barrière permanente.....52
Figure 8. Barrière cyclique.....52
Figure 9. Barrière temporaire.....53
Figure 10. Exemple de graphe constitué de nœuds et de liens.....58
Figure 11. Graphe aux propriétés topologiques identiques.....59
Figure 12. Exemple de graphe complet.....60
Figure 13. Exemple de graphe en "arbre".....60
Figure 14. Exemple de graphe non-planaire.....60
Figure 15. Exemple de graphe pondéré.....61
Figure 16. Exemple de multigraphe.....61
Figure 17. Représentation des modélisations de l'espace maritime dans la littérature.....66
Figure 18. Ablation de composants d'un graphe.....71
Figure 19. Modification d'un composant d'un graphe.....71
Figure 20. Structure spatiale irrégulière non-topologique (Langlois, 2010).....75
Figure 21. Structure spatiale topologique en réseau (Langlois, 2010).....75
Figure 22. Structure spatiale topologique irrégulière (Diagramme de Voronoï) (Langlois, 2010).....76
Figure 23. Structure spatiale topologique régulière (Maille hexagonale) (Langlois, 2010).....76
Figure 24. Transformation d'un carré avec les distances de Von Neumann, Moore et euclidienne.....79
Figure 25. Typologie des dynamiques spatiales.....82
Figure 26. Typologie des dynamiques temporelles.....82

Figure 27. Comparaison de fonctionnement entre un objet et un agent (Ferber, 1997) 88
Figure 28. Entité sous UML.....91
Figure 29. Entité sous AML.....92
Figure 30. Priorisation des plus courts chemins dans l'espace de simulation 106
Figure 31. Diagramme de classe du système de simulation 112
Figure 32. Classe "Territoire" du modèle 113
Figure 33. Classe "Cellule" du modèle 114
Figure 34. Classe "Voyage" du modèle 115
Figure 35. Classe "Navire" du modèle.....116
Figure 36. Classe "Perturbation" du modèle.....117
Figure 37. Classe "Port" du modèle.....118
Figure 38. Classe "Route" du modèle 119
Figure 39. Classe "Réseau" du modèle 120
Figure 40. Diagramme de séquence du fonctionnement du système de simulation sans perturbation 123
Figure 41. Diagramme de séquence du fonctionnement du système de simulation avec perturbation 126
Figure 42. Indice 1 - Intermédiarité des cellules.....128
Figure 43. Indice 2 - Matrice des voyages.....129
Figure 44. Indice 3 - Performance des routes 130
Figure 45. Indice 4 - Rapport utilisation/intermédiarité 131
Figure 46. Indice 5 - Matrice des déviations.....132
Figure 47. Indice 6 - Retard des ports.....133
Figure 48. Indice 7 - Coût additionnel lié à la distance 134
Figure 49. Indice 8 - Coût additionnel lié aux retards 135
Figure 50. Diagramme de séquence du calcul des indicateurs dans le système de simulation 137
Figure 51. Spécification des agents sous AnyLogic 139
Figure 52. Implémentation de l'espace de simulation sous AnyLogic 139
Figure 53. Implémentation des cellules maritimes et terrestres sous AnyLogic 140
Figure 54. Implémentation des ports sous AnyLogic 140
Figure 55. Implémentation de l'algorithme de Djisktra sous AnyLogic.....141
Figure 56. Implémentation des navires sous AnyLogic.....142
Figure 57. Processus de calcule des voyages.....143

Figure 58. Processus de recalcul des volumes 143
Figure 59. Processus de déplacement des navires 144
Figure 60. Contrôles utilisateur pour générer les perturbations économiques 145
Figure 61. Contrôles utilisateur pour générer les perturbations spatiales 145
Figure 62. Perturbation spatiale implémentée dans l'espace de simulation 146
Figure 63. Contrôles utilisateur pour générer les perturbations spatio-temporelles 146
Figure 64. Perturbation spatio-temporelle implémentée dans l'espace de simulation 147
Figure 65. Structure spatiale de 20*20 cellule et relation de voisinage en distance de Von Neumann 153
Figure 66. Graphe complet de 3, 5 et 10 nœuds. 154
Figure 67. Scénario 1,2,3 – 5 ports/20*20 Cellules/70% Maritime / Attendre - Pas de perturbation spatiale 159
Figure 68. Scénario 4 – 5 ports/20*20 Cellules/70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal 159
Figure 69. Scénario 5 – 5 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 20 cellules dont 15 sur réseau optimal 159
Figure 70. Scénario 6 – 5 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 2 159
Figure 71. Scénario 7 – 5 ports / 20*20 Cellules /70% Maritime / Attendre - Perturbation spatio-temporelle – vitesse 1 taille 5 160
Figure 72. Scénario 8 – 5 ports / 20*20 Cellules /70% Maritime / Attendre - Perturbation spatio-temporelle adaptative 160
Figure 73. Scénario 9 – 5 ports / 10*10 Cellules /70% Maritime / Attendre - Pas de perturbation 160
Figure 74. Scénario 10 – 5 ports / 30*30 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Pas de perturbation 160
Figure 75. Scénario 11 – 5 ports / 10*10 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal 161
Figure 76. Scénario 12 – 5 ports / 30*30 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal 161
Figure 77. Scénario 13 – 3 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal 161
Figure 78. Scénario 14 – 3 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Changer - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal 161

Figure 79. Scénario 15 – 5 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Changer - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal.....162
Figure 80. Scénario 16 – 10 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Changer - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal.....162
Figure 81. Scénario 17 – 10 ports / 20*20 Cellules / 70% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal.....162
Figure 82. Scénario 18 – 5 ports / 20*20 Cellules / 60% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal.....162
Figure 83. Scénario 19 – 5 ports / 20*20 Cellules / 50% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal.....163
Figure 84. Scénario 20 – 5 ports / 20*20 Cellules / 80% Maritime / Attendre - Perturbation spatiale – 10 cellules dont 5 sur réseau optimal.....163
Figure 85. Intermédiarité des cellules dans le scénario 1 (à gauche) et scénario 9 (à droite).164
Figure 86. Fréquentation des cellules dans le scénario 14 (à gauche) et scénario 17 (à droite) 165
Figure 87. Impact des perturbations sur les routes dans le scénario 5 (à gauche) et scénario 11 (à droite).....166
Figure 88. Rapport réseau perturbé/réseau optimal dans le scénario 19 (à gauche) et scénario 16 (à droite).....167
Figure 89. Cellules utilisées pour les déviations dans le scénario 15 (à gauche) et scénario 12 (à droite).....168
Figure 90. Retards des ports dans le scénario 18 (à gauche) et scénario 19 (à droite) 169
Figure 91. Rapport perte de performance/perte d'accessibilité dans les scénarios de simulation 176
Figure 92. Déviation des routes maritimes dans le scénario 12.....177
Figure 93. Intermédiarité des cellules dans le scénario 20 178

Bibliographie

Achurra-Gonzalez, Pablo E., Matteo Novati, Roxane Foulser-Piggott, Daniel J. Graham, Gary Bowman, Michael G.H. Bell, et Panagiotis Angeloudis. 2016. « Modelling the Impact of Liner Shipping Network Perturbations on Container Cargo Routing: Southeast Asia to Europe Application ». *Accident Analysis & Prevention*, juin. https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.030.

Alhadeff-Jones, MICHEL. 2008. « Trois générations de théories de la complexité : Nuances et ambiguïtés ».*Traduit et adapté par l'auteur de «Three generations of complexity theories: Nuances and ambiguities», Educational Philosophy and Theory of Education* 40 (1):66–82.

Aven, Terje. 2012. « The Risk Concept—historical and Recent Development Trends ». *Reliability Engineering & System Safety* 99 (mars):33‑44. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.11.006.

Bahoken, Françoise, et Matthieu Drevelle. 2013. « Les réseaux dans le temps et dans l'espace : Synthèse de la seconde journée du groupe fmr ». *Netcom*, n° 27‑3/4 (octobre) :411‑26. https://doi.org/10.4000/netcom.1488.

Barthélemy, Marc. 2011. « Spatial Networks ». *Physics Reports* 499 (1‑3) :1‑101. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.11.002.

Beguin, Hubert, et Isabelle Thomas. 1997. « Morphologie Du Réseau de Communication et Localisations Optimales D'activités. Quelle Mesure Pour Exprimer La Forme D'un Réseau ? » *Cybergeo*, avril. https://doi.org/10.4000/cybergeo.2189.

Berdica, Katja, et Lars-Göran Mattsson. 2007. « Vulnerability: A Model-Based Case Study of the Road Network in Stockholm ». In *Critical Infrastructure*, édité par Alan T. Murray et Tony H. Grubesic, 81‑106. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-68056-7_5.

Berle, Øyvind, Bjørn Egil Asbjørnslett, et James B. Rice. 2011. « Formal Vulnerability Assessment of a Maritime Transportation System ». *Reliability Engineering & System Safety* 96 (6):696‑705. https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.12.011.

Boccaletti, S, V Latora, Y Moreno, M Chavez, et D Hwang. 2006. « Complex Networks: Structure and Dynamics ». *Physics Reports* 424 (4‑5):175‑308. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009.

Bouquet, Fabrice, David Sheeren, Nicolas Becu, Benoit Gaudou, Christophe Lang, Nicolas Marilleau, et Claude Monteil. 2015. *Formalisme de description des modèles agent*. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01253056/.

Bousquet, François, Christophe Le Page, et Jean-Pierre Müller. 2002. « Modélisation et simulation multi-agent ». *deuxièmes assises du GDRI3*. http://www.irit.fr/GDR-I3/fichiers/assises2002/papers/09-ModelisationEtSimulationMultiAgents.pdf.

Brocard, Madeleine, Olivier Joly, et Benjamin Steck. 1995. « Les réseaux de circulation maritime ». *Mappemonde*, n° 1/1995.

Casti, John. 1994. *Complexification: Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*. New York: HarperCollins.

Cervenka, Radovan, et Ivan Trencansky. 2007. *The Agent Modeling Language - AML: A Comprehensive Approach to Modeling Multi-Agent Systems*. Whitestein Series in Software Agent Technologies and Autonomic Computing. Basel: Birkhäuser.

Claramunt, Christophe, et Marius Thériault. 1995. « Managing Time in GIS An Event-Oriented Approach ». In *Recent Advances in Temporal Databases*, édité par James Clifford *et al.*exander Tuzhilin, 23‑42. London: Springer London. http://link.springer.com/10.1007/978-1-4471-3033-8_2.

Crooks, Andrew T., *et al.*ison J. Heppenstall. 2012. « Introduction to Agent-Based Modelling ». In *Agent-Based Models of Geographical Systems*, édité par Alison J. Heppenstall, Andrew T. Crooks, Linda M. See, et Michael Batty, 85‑105. Dordrecht: Springer Netherlands. http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-90-481-8927-4_5.

Daudé Eric, 2004. Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion. *Cybergeo* (2004). doi:10.4000/cybergeo.3835

Daudé, Eric. 2005. « Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle ». *Modélisation en Géographie : déterminismes et complexités*, n° chap. 13 :353–380.

Di Méo, Guy. 2008. « Une géographie sociale entre représentations et action ». *Montagnes méditerranéennes et développement territorial*, n° 23 (Numéro Spécial Représentation, Action, Territoire) :13–21.

Dollfus, Olivier. 2007. *La mondialisation*. (Presses de Sciences Po, 2007).

Ducruet, César. 2013. « Network Diversity and Maritime Flows ». *Journal of Transport Geography* 30 (juin):77‑88. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.03.004.

Ducruet, César. 2016. *Maritime Networks: Spatial Structures and Time Dynamics*. http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1077186.

Ducruet, César, et Igor Lugo. 2013. « Structure and dynamics of transportation networks: Models ». *The SAGE handbook of transport studies*, 347.

Ducruet, César, et Theo Notteboom. 2012. « The worldwide maritime network of container shipping: spatial structure and regional dynamics ». *Global Networks* 12 (3):395–423.

Elliott, Michael, Nicholas D. Cutts, et Anna Trono. 2014. « A Typology of Marine and Estuarine Hazards and Risks as Vectors of Change: A Review for Vulnerable Coasts and Their Management ». *Ocean & Coastal Management* 93 (juin):88‑99. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.03.014.

Ferber, Jacques. 1997. « Les systèmes multi-agents: un aperçu général ». *Techniques et sciences informatiques* 16 (8). http://www.researchgate.net/profile/Jacques_Ferber/publication/242623967_Les_systemes_multi-agents__un_aperu_general/links/5409e5100cf2df04e7491c02.pdf.

Fransas, Anne, Enni Nieminen, Mirva Salokorpi, Jorma Rytkönen, et others. 2012. « Maritime safety and security: Literature review ». https://www.theseus.fi/handle/10024/46235.

Freeman, L. C. 1978. Centrality in social networks conceptual clarification. *Soc. Netw.* 215

Geurs, Karst T., et Bert van Wee. 2004. « Accessibility Evaluation of Land-Use and Transport Strategies: Review and Research Directions ». *Journal of Transport Geography* 12 (2):127‑40. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005.

Ginet, Pierre. 2012. « Le territoire, un concept opératoire pour la Géographie appliquée (à l'aménagement) ». *Documentaliste-Sciences de l'Information* 49 (3) :26–27.

Gilbert, Nigel. 2007. *Computational Social Science: Agent-based social simulation* In: Agent-based Modelling and Simulation. Bardwell, Oxford, pp. 115-134. ISBN 978-1-905622-01-6

Giray Resat, H., et Metin Turkay. 2015. « Transport and Logistics Models for Sustainability ». In *Computer Aided Chemical Engineering*, 36:401‑20. Elsevier. http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444634726000161.

Gleyze, Jean-François., 2002. *Réseaux, Territoires et Accessibilité .Synthèse bibliographique, rapport du laboratoire COGIT, Institut Géographique National, Saint-Mandé, France, 2ème édition, 136 p*

Gleyze, Jean-François. 2005. « La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques. ». Thèse de doctorat en Analyse Théorique et Épistémologique en Science Géographique, Université Paris VII – Denis Diderot, 848 p.

Goerlandt, Floris, et Jakub Montewka. 2015. « Maritime Transportation Risk Analysis: Review and Analysis in Light of Some Foundational Issues ». *Reliability Engineering & System Safety* 138 (juin):115‑34. https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.01.025.

Grenon, Pierre, et Barry Smith. 2004. « SNAP and SPAN: Towards Dynamic Spatial Ontology ». *Spatial Cognition & Computation* 4 (1):69‑104. https://doi.org/10.1207/s15427633scc0401_5.

Haggett, Peter. 1973. « L'analyse spatiale en géographie humaine. A. Colin, collection U, 1973, 390 p.

Hollnagel, Erik. 1999. « Accidents and barriers ». In *Proceedings of lex valenciennes*, 28:175–182. http://www.hhs.iup.edu/lhrhodes/safe541lhr/Barrier%20Analysis%20Paper.pdf.

Hu, Yihong, et Daoli Zhu. 2009. « Empirical Analysis of the Worldwide Maritime Transportation Network ». *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 388 (10):2061‑71. https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.12.016.

Itoh, Hidekazu, Olaf Merk, et César Ducruet. 2014. « Time Efficiency at World Container Ports ». International Transport Forum Discussion Papers 2014/08. https://doi.org/10.1787/5jrw2z46t56l-en.

Jakob, Michal, Ondřej Vaněk, Branislav Bošanskỳ, Ondřej Hrstka, et Michal Pěchouček. 2011. « AgentC: Agent-based system for securing maritime transit ». In *The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 3*, 1309–1310.

International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems. http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2034540.

Kaluza, P., A. Kolzsch, M. T. Gastner, et B. Blasius. 2010. « The Complex Network of Global Cargo Ship Movements ». *Journal of The Royal Society Interface* 7 (48):1093‑1103. https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0495.

Kravari, Kalliopi, et Nick Bassiliades. 2015. « A Survey of Agent Platforms ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 18 (1). https://doi.org/10.18564/jasss.2661.

Kristiansen, Svein. 2005. *Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis*. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann.

Lammoglia Adrien, Josselin Didier et Marilleau Nicolas, « Some propositions to find optimal conditions to simulate a flexible transport using an Agent-Based Model », Cybergeo : European Journal of Geography. http://journals.openedition.org/cybergeo/27046; doi: 10.4000/cybergeo.27046

Langlois, Patrice. 2010. *Simulation des systèmes complexes en géographie*. Paris: Hermes science publ. : Lavoisier.

Lasserre, F. 2011. Des autoroutes maritimes polaires ? Analyse des stratégies des transporteurs maritimes dans l'Arctique. *Cybergeo* (2011). doi:10.4000/cybergeo.23751

Lhomme, Serge. 2012. « Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain-Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine ». Université Paris-Diderot-Paris VII. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00772204/.

L'Hostis, Alain, *et al.*exis Conesa. 2010. « Définir l'accessibilité intermodale ». *Systèmes de transport urbain*, 24.

Livet, Pierre, Jean-Pierre Muller, Denis Phan, et Lena Sanders. 2010. « Ontology, a Mediator for Agent-Based Modeling in Social Science ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 13 (1). https://doi.org/10.18564/jasss.1538.

Louchet, André. 2014. *La planète océane: précis de géographie maritime*. (A. Colin)

Martinelli, Pini, Torricelli & Widmer. 2000. *Indicateurs d'accès pour une mobilité durable*.

Miller, Harvey J. 1999. « Measuring space-time accessibility benefits within transportation networks: basic theory and computational procedures ». *Geographical analysis* 31 (1):1–26.

Montello, D.R. 2001. « Scale in geography ». In *International encyclopedia of the social & behavioral sciences*.

Moon, Young B. 2017. « Simulation Modelling for Sustainability: A Review of the Literature ». *International Journal of Sustainable Engineering* 10 (1):2‑19. https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1220990.

Morin, Edgar. 2005. *Introduction à la pensée complexe*. Essais 534. Paris : Édition du Seuil.

Muller, Philippe. 2002. « Topological spatio–temporal reasoning and representation ». *Computational Intelligence* 18 (3):420–450.

Murray, Alan T., et Tony H. Grubesic. 2007. « Overview of reliability and vulnerability in critical infrastructure ». In *Critical Infrastructure*, 1–8. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-68056-7_1.

Nicholson, A., Schmocker, J.-D., Bell, M. G. H., & Iida, Y. 2003. "Assessing transport reliability: malevolence and user knowledge," *In The network reliability of transport*, First ed. Oxford, UK: Elsevier Science, pp. 1-21.

Niemeier, Debbie A. 1997. « Accessibility: an evaluation using consumer welfare ». *Transportation* 24 (4):377–396.

Nijkamp, Peter, Piet Rietveld, et Ilan Salomon. 1990. « Barriers in spatial interactions and communications ». *The Annals of Regional Science* 24 (4):237–252.

November, Valérie, Eduardo Camacho-Hübner, et Bruno Latour. 2010. « Entering a Risky Territory: Space in the Age of Digital Navigation ». *Environment and Planning D: Society and Space* 28 (4):581‑99. https://doi.org/10.1068/d10409.

Papa, Paola. 2013. « US and EU Strategies for Maritime Transport Security: A Comparative Perspective ». *Transport Policy* 28 (juillet):75‑85. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.08.008.

Parrain, Camille. 2012. « La haute mer : un espace aux frontières de la recherche géographique ». *EchoGéo*, n° 19 (février). https://doi.org/10.4000/echogeo.12929.

Peuquet, Donna J. 1994. « It's About Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems ». *Annals of the Association of American Geographers* 84 (3):441‑61. https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1994.tb01869.x.

Pumain, Denise. 2003. « Une approche de la complexité en géographie ». *Géocarrefour* 78 (1):25‑31. https://doi.org/10.4000/geocarrefour.75.

Rausand, Marvin. 2011. *Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications*. http://www.books24x7.com/marc.asp?bookid=44422.

Rodrigue, Jean-Paul. 2004. « Straits, Passages and Chokepoints: A Maritime Geostrategy of Petroleum Distribution ». *Cahiers de géographie du Québec* 48 (135):357. https://doi.org/10.7202/011797ar.

Rodrigue, Jean-Paul, Claude Comtois, et Brian Slack, éd. 2013. *The Geography of Transport Systems*. 3. ed. London: Routledge.

Ruas, Anne, et Lena Sanders. 2015. « Regards croisés sur la modélisation des dynamiques spatiales ». *Revue internationale de géomatique* 25 (3):275‑300. https://doi.org/10.3166/rig.25.275-300.

Scemama, G. & Gaudin, E. 1998. Informatisation de la décision dans l'exploitation du transport Atouts des technologies avancées de traitement de l'informationThe computerization of decision-making in transport operation enThe benefits of advanced data processing technologies. *Rech. - Transp. - Sécurité* **61,** 53–72.

Snelder, Maaike. 2010. *Designing robust road networks: a general design method applied to the Netherlands*. TU Delft, Delft University of Technology. http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:82881390-1db0-46ca-8d38-9f89e15c2a92/.

Soares, C.Guedes, et A.P. Teixeira. 2001. « Risk Assessment in Maritime Transportation ». *Reliability Engineering & System Safety* 74 (3):299‑309. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00104-1.

Taillandier, Patrick, Arnaud Grignard, Benoit Gaudou, *et al.*exis Drogoul. 2014. « Des Données Géographiques À La Simulation À Base D'agents : Application de La Plate-Forme GAMA ». *Cybergeo*, mars. https://doi.org/10.4000/cybergeo.26263.

Taylor, Michael A. P., Somenahalli V. C. Sekhar, et Glen M. D'Este. 2006. « Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks ». *Networks and Spatial Economics* 6 (3‑4):267‑91. https://doi.org/10.1007/s11067-006-9284-9.

Taylor, Michael A.P., et Susilawati. 2012. « Remoteness and Accessibility in the Vulnerability Analysis of Regional Road Networks ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (5):761‑71. https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.008.

Trencansky, Ivan, et Radovan Cervenka. 2005. « Agent Modeling Language (AML): A comprehensive approach to modeling MAS ». *Informatica* 29 (4).

Trouillet, Brice. 2006. La mer-territoire ou la banalisation de l'espace marin (Golfe de Gascogne). *Mappemonde* (2006).

Veenstra, Albert W., Henry Martyn Mulder, et R. Alexander Sels. 2005. « Analysing Container Flows in the Caribbean ». *Journal of Transport Geography* 13 (4):295‑305. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.07.006.

Veyret, Y, et M Reghezza. 2005. « Aléas et risques dans l'analyse géographique ». *Annales des mines*, 61‑89.

Vigarié, André. 1983. « Les tendances d'évolution des transports maritimes (1955-1985) ». *Annales de Géographie* 92 (509):53‑72. https://doi.org/10.3406/geo.1983.20168.

Wakabayashi, H. & Iida, Y. 1992. Upper and lower bounds of terminal reliability of road networks: an efficient method with boolean algebra. *J. Nat. Disaster Sci.*

Wooldridge, Michael, Nicholas R. Jennings, et David Kinny. 2000. « The Gaia methodology for agent-oriented analysis and design ». *Autonomous Agents and multi-agent systems* 3 (3):285–312.

Xu, Mengqiao, Zhenfu Li, Yanlei Shi, Xiaoling Zhang, et Shufei Jiang. 2015. « Evolution of Regional Inequality in the Global Shipping Network ». *Journal of Transport Geography* 44 (avril):1‑12. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.02.003.

Zavitsas, Kostas. 2012. « The vulnerability of the petroleum supply chain ». Imperial College London.

Zoor, Maysam. 2017 « Implementing a multi-agent system for Maritime Network Analysis». Centre de recherche sur les Risques et les Crises.

Résumé

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. 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. Cela forme ainsi un réseau de transport maritime et d’approvisionnement lié à l’emplacement des ports dans le monde et des routes maritimes les reliant. 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. Ce réseau d’approvisionnement est vulnérable face à certains événements (perturbations) pouvant affecter la performance du réseau maritime : les tempêtes, les pénuries, la piraterie sont des événements ayant une influence sur l’efficacité du réseau maritime. L’ensemble de ces risques peuvent être mesurés et quantifiés dans les caractéristiques topologiques, géométriques et relationnelles des graphes. Afin de tester les perturbations sur les caractéristiques du réseau, un système de simulation est mis en place. Pour cela, les perturbations sont modélisées par des objets spatio-temporels ayant une influence sur l’accessibilité à l’espace des navires. Ce système de simulation permet d’évaluer les variations topologiques et géométriques du graphe en fonction des perturbations dans l’espace maritime, grâce des indicateurs mis en place pour mesurer la vulnérabilité des réseaux Cette recherche permet de mieux comprendre l’influence de ces perturbations sur le fonctionnement d’un réseau de transport dans un espace ouvert, tel que le réseau maritime.

Abstract

The growth of transportation on a global scale is due to a phenomenon of globalization. Today, 90% of the goods traded around the world are carried by sea. This phenomenon transforms territories, and mainly coastal areas, but also results in the territorialization of maritime areas, namely the use and management of spaces for human activities. This forms a maritime transport and supply network related to the location of ports around the world and the shipping routes connecting them. However, this network extends over a vast and dynamic space, the maritime area, which can generate risks for the use of space for transport purposes. This network is vulnerable to some events (disruptions) that can affect the performance of the maritime network: storms, shortages, piracy are events that influence the efficiency of the maritime network. All these risks can be measured and quantified in the topological, geometric and relational characteristics of the graphs. In order to test the disturbances on the characteristics of the network, a simulation system is created and use. For this, the disruptions are modeled by spatio-temporal objects having an influence on the accessibility to the space of the ships. This simulation system makes it possible to evaluate the topological and geometric variations of the graph as a function of the disturbances in the maritime area, by using adapted indicators to measure the vulnerability of the networks. This research help to better understand the influence of these disruptions on the sea.