



Algorithmique et applications pour les flottes hétérogènes multiniveaux de matériels mobiles communicants autonomes

Sébastien Bindel

► To cite this version:

Sébastien Bindel. Algorithmique et applications pour les flottes hétérogènes multiniveaux de matériels mobiles communicants autonomes. Autre [cs.OH]. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0172 . tel-01407363

HAL Id: tel-01407363

<https://theses.hal.science/tel-01407363>

Submitted on 2 Dec 2016

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
**DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE DE MATHÉMATIQUES ET D'INFORMATIQUE
SPÉCIALITÉ : INFORMATIQUE

Par Sébastien BINDEL

**Algorithmique et applications pour les flottes hétérogènes
multiniveaux de matériels mobiles communicants autonomes**

Sous la direction de: Serge Chaumette
Co-directeur: Olivier Ly

Soutenue le 3 octobre 2016

Après avis des rapporteurs :

M.	Coppin, Gilles	PR	Telecom Bretagne
M.	Togni, Olivier	PR	Université de Bourgogne

Devant la commission d'examen composée de :

M.	Chaumette, Serge	PR	Université de Bordeaux	Directeur de Thèse
M.	Ly, Olivier	MCF HDR	Université de Bordeaux	Co-Directeur de Thèse
M.	Coppin, Gilles	PR	Telecom Bretagne	Rapporteur
M.	Togni, Olivier	PR	Université de Bourgogne	Rapporteur
M.	Hilt, Benoît	MCF	Université de Haute Alsace	Examineur
M.	Magoni, Damien	PR	Université de Bordeaux	Examineur
M.	Mbarek, Nader	MCF	Université de Bourgogne	Examineur
Mme.	Serfaty, Véronique	Docteur	DGA	Examinatrice

Titre : Algorithmique et applications pour les flottes hétérogènes multiniveaux de matériels mobiles communicants autonomes

Résumé : Les véhicules autonomes sont des engins mobiles caractérisés par l'absence de pilote à leur bord et font partie d'un système plus global comprenant des éléments tels qu'une station de contrôle. Ils présentent la particularité d'avoir une conception spécifique liée à la mission assignée et peuvent être déployés dans des milieux divers et hétérogènes, incluant le milieu spatial, aérien, terrestre, marin de surface et sous-marin.

Certaines missions requièrent la coopération de véhicules hétérogènes, où chaque type de véhicule réalise une mission locale pour permettre la réalisation d'une mission globale. La coopération entre les véhicules nécessite l'interopérabilité des communications. Même si des efforts ont été entrepris dans ce sens en normalisant les couches applicatives, ces travaux restent insuffisants. En effet, il n'existe pas de protocole qui assure l'acheminement des données entre différents types de véhicules qui possèdent une mobilité propre et utilisent parfois des médias de communication différents, comme les engins sous-marins et terrestres.

L'objectif principal de cette thèse est de permettre à tous les engins de communiquer entre eux et de rendre cette interconnexion transparente. Pour cela, nous adoptons une approche multicouche qui nous permet de diffuser et d'acheminer des données vers n'importe quel engin. Il devient alors possible pour chaque véhicule de transmettre des données de manière transparente à un autre véhicule de nature différente sans connaître la topologie globale du réseau. Pour cela nous avons conçu un protocole de routage qui adapte sa politique en fonction du contexte et de l'environnement. Nous exploitons également un mode de diffusion qui permet de transmettre des données vers un engin faisant partie d'un groupe cible en nous basant sur leurs caractéristiques afin d'acheminer les données de manière optimale.

Mots clés : Systèmes autonomes, mobilité, routage, apprentissage automatique.

Title : Algorithms and applications for mobile communicating multi-level heterogeneous unmanned systems

Abstract : Unmanned vehicles are defined as autonomous entities with no operator on board. They are a part of a global system called Unmanned System which also includes elements such as a control station. These vehicles are designed to fulfil the requirements of assigned missions and can be deployed in spatial, aerial, terrestrial and maritime environments.

Since a mission cannot be accomplished with a single vehicle, vehicles have to cooperate in order to achieve a global mission. However, cooperation requires communication interoperability between all vehicles. Even if previous works have standardized application protocols, it is not sufficient to ensure data delivery between all vehicles, since they have a specific mobility pattern and sometimes different network interfaces.

The main goal of this thesis is to offer a seamless network, including all kinds of unmanned systems. We propose a cross layer approach in order to route and deliver data to any vehicle. In this context, each vehicle is able to transmit data to another without information on the global topology. We have developed a routing protocol, which adapts its strategy, according to the context and to the network environment. In addition, we exploit the anycast diffusion technique based on vehicles features in order to adopt an optimal routing scheme.

Keywords : Unmanned systems, mobility, routing, machine learning.

Remerciements

J'adresse mes remerciements à Monsieur Pascal Weil directeur du Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI) pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse, le Professeur Serge Chaumette et le Maître de Conférences Olivier Ly, qui m'ont confié ce sujet de recherche et qui m'ont fait confiance pour mener à bien ce travail.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à Monsieur Gilles Coppin Professeur à Télécom Bretagne et Monsieur Togni Olivier Professeur à l'Université de Bourgogne, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit. Je remercie Monsieur Damien Magoni Professeur à l'Université de Bordeaux de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse. Je tiens également à remercier vivement Monsieur Benoît Hilt Maître de Conférence à l'Université de Haute Alsace et Monsieur Nader Mbarek Maître de Conférence à l'Université de Bourgogne, qui bien plus qu'examineurs de cette thèse, m'ont donné goût à la recherche et ont suivi mon parcours avec bienveillance. Enfin, je remercie Mme Serfaty Véronique d'avoir accepté d'être examinatrice de cette thèse.

Je tiens également à remercier tous les membres du LaBRI pour ces années passées ensemble et plus particulièrement les membres de la CVT qu'ils soient nouveaux ou anciens (Christelle, Cyril, Daouda, Damien, Bibi, Hugo, Jigar, Jo, Martin, Mathieu, Rémi, Vincent A, Vincent K, Yassin) pour leur soutien apporté durant ces années.

D'un point de vue plus personnel je tiens à remercier ma famille et mes proches pour leur soutien. Enfin, je remercie toutes les personnes que j'ai rencontrées durant cette période sur Bordeaux, qui m'ont permis de me découvrir.

A toutes ces personnes, je vous exprime toute ma reconnaissance.

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	III
Liste des tableaux	VII
Acronymes	IX
Introduction générale	1
I Contexte & État de l'art	5
Introduction	7
1 Les systèmes autonomes et leurs enjeux	9
1.1 Introduction	9
1.2 Taxonomie des systèmes autonomes	10
1.3 Systèmes orientés mission	16
1.4 Conclusion	18
2 Contexte et problématiques	19
2.1 Introduction	19
2.2 Mission de référence de cette thèse	20
2.3 Problématiques sous-jacentes	20
2.4 L'approche proposée	33
2.5 Conclusion	34
3 Les réseaux ad-hoc associés aux systèmes autonomes	35
3.1 Introduction	35
3.2 Taxonomie des réseaux ad-hoc	36
3.3 Étude des médias physiques de communication	38
3.4 Couche liaison de données	46
3.5 Conclusion	56
4 Techniques de découverte de voisinage, de routage et modèles associés	57
4.1 Introduction	57
4.2 Estimation de la qualité de lien dans les réseaux sans fil	59
4.3 Découverte de voisinage dans les réseaux sous-marins	64
4.4 Protocoles de routage pour les réseaux terrestres	66
4.5 Protocoles de routage dans les réseaux sous-marins	73
4.6 Modèles associés	77
4.7 Conclusion	80

II Contributions & Résultats	83
Introduction	85
5 Estimateurs prédictifs d'état des liens pour les réseaux mobiles	89
5.1 Introduction	89
5.2 Étude de l'estimateur ETX	90
5.3 Conception de l'estimateur de qualité de lien	95
5.4 Les estimateurs compagnons	100
5.5 Conclusion	106
6 Protocole de routage DTN pour les réseaux acoustiques sous-marins mobiles	107
6.1 Introduction	107
6.2 Contexte	108
6.3 Techniques d'apprentissage par renforcement	110
6.4 Conception du protocole de routage	113
6.5 Simulation et évaluation de performance	120
6.6 Conclusion	124
7 Protocole de routage MANET/DTN pour les réseaux terrestres	125
7.1 Introduction	125
7.2 Les protocoles de routages hybride MANET-DTN	126
7.3 Conception du protocole hybride MANET/DTN	127
7.4 Simulation et évaluation des performances	136
7.5 Conclusion	142
8 Modèle de groupe et routage anycast	143
8.1 Introduction	143
8.2 Modèle et routage	144
8.3 Interopérabilité avec le protocole IP	151
8.4 Simulation et évaluation	156
8.5 Conclusion	158
Conclusion générale et perspectives	159
Bibliographie	163
A Processus suivi par les nœuds leaders et esclaves	181
A.1 Schéma du processus suivi par un nœud leader	181
A.2 Schéma du processus suivi par un nœud esclave	182
B Détail du calcul des estimateurs F-LQE et HoPS	183
B.1 F-LQE	183
B.2 HoPS	184

Liste des figures

2.1	Représentation schématique du scénario	20
2.2	Topologie des réseaux étendus	28
2.3	Topologie des réseaux WiMAX	29
2.4	Topologie des réseaux Wi-Fi	29
2.5	topologie des réseaux maillés sans fil	30
2.6	Topologie des réseaux Bluetooth	30
2.7	Topologie des réseaux 802.15.4	31
2.8	Les techniques de diffusion	33
3.1	Canal de propagation et canal de transmission	38
3.2	Nature et propagation d'une onde électromagnétique	39
3.3	Domaines du spectre électromagnétique	39
3.4	Principaux mécanismes de propagation d'une onde	41
3.5	Illustration de la présence de chemins multiples dans les milieux petits et grands fonds	45
3.6	Profil bathycélérimétrique	45
3.7	Techniques de multiplexage	47
3.8	Technique d'accès ALOHA	48
3.9	Technique d'accès S-ALOHA	49
3.10	Taux de réception fournie par ALOHA et CSMA en fonction de la charge de trafic du réseau	49
3.11	Problématique de la machine cachée et surexposée	50
3.12	Accès par contention au média avec MACA	51
3.13	Accès au média avec PCAP	52
3.14	Collision d'un RTS avec des données	53
3.15	Fonctionnement du protocole T-Lohi	54
4.1	Taxonomie des principes de routage	58
4.2	PRR en fonction du RSSI, du SNR et du LQI	61
4.3	Processus de découverte des liens de Rice et Wei.	65
4.4	Principe de diffusion des messages avec OLSR	67
4.5	Détection et sélection de la route la plus courte entre le nœud A et le nœud C	68
4.6	Exemple d'une zone définie par le nœud central avec ZRP	69
4.7	Routage dans les réseaux MANETs et DTNs	71
4.8	Schéma de la classification des protocoles de routages acoustique sous-marins . . .	74
4.9	Topologie du réseau acoustique sous-marin formée par le protocole de Seah et Tan .	74
4.10	Architecture utilisée par le protocole DBR	76
4.11	Modèles de calculs locaux	78
4.12	Exemple d'un graphe évolutif	78
4.13	Exemples de réactions à des événements topologiques avec DAGRS	79
4.14	LC0 asynchrone	79
4.15	Exemple d'une règle de ré-étiquetage en ADAGRS	79

4.16 Illustration de la gestion d'évènements avec ADAGRS	80
4.17 Gestion d'un évènement applicatif en ADAGRS	80
4.18 Le nœud consommateur (C) et producteur (P) peuvent accéder simultanément à la file de message	80
5.1 Évaluation des liens avec ETX	90
5.2 Fonctionnement de ETX	91
5.3 Performance du mécanisme de fenêtrage de ETX	94
5.4 Mécanisme de décroissance de la fenêtre	95
5.5 Comportement des fenêtres dynamiques de la métrique F-ETX	96
5.6 Consommation énergétique des estimateurs ETX et F-ETX	98
5.7 Coefficient de variation des estimateurs de qualité	99
5.8 CDFs empiriques de ETX et F-ETX	99
5.9 Estimation à court terme vs. Tendance	100
5.10 Analyse qualitative du scénario Manhattan	103
5.11 Analyse qualitative du scénario Disaster	104
5.12 Analyse statistiques des liens	105
6.1 Principe de l'apprentissage par renforcement	110
6.2 Schéma de l'architecture du protocole de routage pour les réseaux sous-marins mo- biles	114
6.3 Illustration de la métrique de rencontre moyenne	114
6.4 Détermination de la probabilité de rencontre récente	115
6.5 Détermination de la probabilité de rencontre indirecte	116
6.6 Exemple d'un graphe de transition	116
6.7 Gestion de la priorité des paquets	118
6.8 Format du paquet BEACON du protocole de routage des réseaux sous-marins	119
6.9 Format des métadonnées ajoutées par le protocole de routage des réseaux sous- marins	120
6.10 Détail du champ Réponse	120
6.11 Caractérisation des communications acoustiques sous-marines	121
6.12 PDR en fonction du débit applicatif	122
6.13 Délai d'acheminement en fonction du débit applicatif	123
6.14 Consommation énergétique moyenne des nœuds	123
7.1 Graphe évolutif : trajet strict et trajet non strict	126
7.2 Illustration d'un échange des ratios entre deux nœuds pour calculer la qualité d'un lien	128
7.3 Évaluation d'un lien local avec F-ETX	128
7.4 Évaluation de la qualité d'un chemin	130
7.5 Problème de sélection d'un chemin	131
7.6 Interaction entre F-ETX et le protocole de routage	132
7.7 Étude du scénario DTN vers MANET	133
7.8 Protocole hybride MANET/DTN : format du message d'annonce	134
7.9 Protocole hybride MANET/DTN : format des métadonnées	135
7.10 Détail du champ Réponse	135
7.11 Taux de délivrance moyen en fonction du nombre de nœuds (MANET)	138
7.12 Délai moyen en fonction du nombre de nœuds (MANET)	138
7.13 Taux de délivrance moyen en fonction du débit applicatif (MANET)	139
7.14 Délai moyen d'acheminement de bout en bout en fonction du débit applicatif (MA- NET)	140
7.15 Taux de paquets délivrés en fonction du nombre de nœuds (DTN)	141
7.16 Délai moyen en fonction du nombre de nœuds (DTN)	141

7.17 Taux de paquets délivré en fonction du nombre de nœuds (MANET/DTN)	142
7.18 Taux de paquets délivré en fonction du nombre de nœuds (MANET/DTN)	142
8.1 Segmentation du réseau des systèmes autonomes	144
8.2 Format de l'identifiant de groupe	145
8.3 Représentation des sommets	147
8.4 Annonce du sommet à son voisinage	147
8.5 Réception et mise à jour des informations de routage	147
8.6 Demande de transmission d'un message d'information	148
8.7 Création d'un message contenant des métadonnées de routage	148
8.8 Retransmission d'un message de routage par un nœud hybride	149
8.9 Évaluation du meilleur chemin vers un groupe	150
8.10 Segmentation du réseau : l'approche avec IPv4	152
8.11 Segmentation du réseau : l'approche conjointe IPv4/MAC	153
8.12 Transformation d'une adresse MAC en identifiant d'interface	154
8.13 Format d'une adresse de lien local	155
8.14 Format d'une adresse globale	155
8.15 Format d'une adresse anycast	155
8.16 Plan d'adressage unicast/anycast avec IPv6	156
8.17 Taux moyen de paquets délivrés en fonction du nombre de nœuds	157
8.18 Délai moyen d'acheminement en fonction du nombre de nœuds	157
A.1 Algorithme d'un nœud leader	181
A.2 Algorithme d'un nœud esclave	182

Liste des tableaux

2.1	Modèles de mobilité des engins aériens	23
2.2	Modèles de mobilité des engins terrestres	25
2.3	Modèles de mobilité pour les engins marins et sous-marins	26
2.4	Comparaison des architectures de réseaux terrestres	32
3.1	Caractéristiques des sous-catégories de MANETs	38
3.2	Gammes des fréquences utilisées par les systèmes acoustiques sous-marins	43
3.3	Transition d'état dans MACA-U	52
5.1	Temps de détection d'une rupture de lien	96
5.2	Paramètres de simulation	97
5.3	Consommation énergétique du modèle WifiRadioEnergy	98
6.1	Débit de transmission du micro-modem	109
6.2	Comparaison de la consommation énergétique du micromodem WHOI et d'une interface Wi-Fi	109
6.3	Paramètres de l'environnement de simulation pour les réseaux acoustiques sous-marins	121
6.4	Comparaison des performances des protocoles	124
7.1	Paramètres du simulateur ns-3 pour les scénarios MANET	137
7.2	Variable aléatoire des simulations des réseaux MANETs	137
8.1	Identifiant multiniveau des engins	145
8.2	Taille des messages de routage	150
8.3	Classes d'adresses avec IPv4	151
8.4	Plages d'adresses privées avec IPv4	151
8.5	Types d'adresse IPv6	154

Acronymes

- A-DTN** Assisted DTNs. 58
- AANET** Aeronautical Ad hoc NETwork. 36
- ACK** Acquittement. 63
- ADAGRS** Asynchronous Dynamicity Aware Graph Relabeling System. 79–81, 144, 146
- AGV** Automated Guided Vehicle. 13
- AGVS** Automated Guided Vehicle System. 13
- AMR** Adaptive Multi-copy Routing. 72
- AODV** Ad hoc on-demand distance vector. 67, 68, 70, 73, 127
- ARCEP** Autorité de Régulation des Communications Electronique et des Postes. 28
- ARQ** Automatic Repeat Request. 8, 46, 54–56, 63
- ARR** Acknowledgment Reception Ratio. 63
- ASL** ASymmetric Link level. 63
- ASM** Accoustique Sous-Marine. 43
- ASNR** Average Signal to Noise Ratio. 64
- AUV** Autonomous Underwater Vehicle. 17, 20, 26, 27, 37
- BATMAN** Better Approach to Mobile Adhoc Networking. 127
- BEB** Binary Exponential Backoff. 51
- BER** Bit Error Rate. 61
- BS** Base Station. 28
- BTS** Base Transceiver Station. 28
- CAR** Context-Aware Routing. 126
- CBRP** Cluster Based Routing Protocol. 69
- CDMA** Code Division Multiple Access. 47, 48
- CSMA** Carrier Sense Multiple Access. 49, 56
- CTP** Collection Tree Protocol. 132
- CTS** Clear to Send. 50–53
- DACAP** Distance-Aware Collision Avoidance Protocol. 53
- DAGRS** Dynamicity Aware Graph Relabeling System. 78, 79
- DAMA** Dynamic Assignment Multiple Access. 48
- DBR** Depth Based Routing. 76
- DBTMA** Dual Busy Tone Multiple Access. 53
- DCF** Distributed Coordination Function. 50
- DDD** Delay-tolerant Data Dolphin. 75

DFR Directional Flooding-Based Routing. 75

DGPS Differential Global Positioning System. 16

DHR DTN Hierarchical Routing. 72

DoD Département de la Défense des États-Unis. 11

DS Data Sending. 51

DSDV Destination-Sequenced Distance Vector. 59, 70, 73

DSR Dynamic Source Routing. 65, 68, 70, 73, 75

DSSS Direct Sequence Spread Spectrum. 61, 62

DTLSR Delay Tolerant Link State Routing. 72

DTN Delay Tolerant Network. 3, 18, 58, 70, 72–75, 77, 81, 109, 113, 126, 127

DTS-OLSR Delay Tolerant Structured OLSR. 127

ENAC École Nationale de l'Aviation Civile. 21

eNode B evolved Node B. 28

ETSI European Telecommunications Standards Institute. 30

ETX Expected Transmission Count. 63, 65, 66, 75, 90, 98–100

EUROP Energy-Efficient Routing Protocol. 75

EWMA Exponentially Weighted Moving Average. 60, 101

F-ETX Fast-ETX. 90, 98–100, 106

F-LQE Fuzzy-LQE. 63, 64, 102

FAA Federal Aviation Administration. 12

FAMA Fixed Assignment Multiple Access. 48

FANET Flying Ad-Hoc Network. 29, 36, 37

FBR Focused Beam Routing. 75

FCS Future Combat Systems. 16

FDMA Frequency Division Multiple Access. 47, 48

FER Frame Error Rate. 66

FFD Full Fonction Device. 30, 31

FIFO First In First Out. 51, 79, 80

FP Flight-Plan. 21, 22

FSK Frequency Shift Keying. 108

FSR Fisheye State Routing. 66, 67

GPS Global Positioning System. 16, 69

GRS Graph Relabeling System. 77, 78

H-ARQ Hybrid-ARQ. 55

HH-VBF Hop-by-Hop Vector Based Forwarding. 75

HoPS Holistic Packet Statistics. 64

HYMAD HYbrid MANet Dtn. 126

IARP IntrAzone Routing Protocol. 68

ICIAO International Civil Aviation Organization. 12

ICRP Information-Carrying Routing Protocol. 74

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. 27–30, 50, 61

IERP IntErzone Routing Protocol. 68

IETF Internet Engineering Task Force. 31

IMS Intelligent Munitions Systems. 16

IP Internet Protocol. 2, 85

IRR Intervalle de Rencontre Récent. 115

ISO International Organization for Standardization. 32

JAUS Joint Architecture for Unmanned Systems. 1, 7, 34, 85

LAM Loiter Attack Munitions. 16

LANMAR Landmark Ad Hoc Routing. 67

LASR Location Aware Source Routing. 65, 75

LC Local Compute. 77–79, 81

LI Link Inefficiency. 63

LMS Least Mean Squares. 77

LOS Line Of Sight. 40

LQI Link Quality Indicator. 61

LR-WPAN Low Rate -Wireless Personnal Area Network. 30

MAC Media Access Control. 29–31, 55, 62, 64, 85

MACA Multiple Access Collision Avoidance. 51

MACA-U Multiple Access Collision Avoidance for Underwater. 52

MACAW MACA Wireless. 51

MANET Mobile Adhoc NETwork. 3, 21, 22, 24, 29, 36, 54, 58, 70, 72, 73, 81, 126, 127

MDP Processus de Décision Markovien. 111, 116

MILD Multiplicative Increase Linearly Decrease. 51

MPR MultiPoint Relays. 66

MS Mobile Station. 28

NANET Nautical Adhoc NETwork. 37

NIST National Institute of Standard and Technology. 10, 15

NLOS Non Line Of Sight. 40

NLOS-LS Non-Line-of-Sight-Launch Systems. 16

NRP Requested Number of Packets. 63

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing. 47, 62

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access. 47

OLSR Optimized Link State Routing. 66, 73

OSI Open System Interconnection. 54, 56

OTAN Organisation du Traité de l’Atlantique Nord. 32

PAM Precision Attack Munitions. 16

PAN Personnal Area Network. 31

PCAP Propagation delay tolerant Collision Avoidance Protocol. 51, 52

PDR Packet Delivery Ratio. 62

PER Packet Error Rate. 61

PHY Couche physique du modèle OSI, ou *Physical layer of the OSI model*. 62

POI Point Of Interest. 17, 97

PRR Packet Reception Ratio. 61–64, 81, 102

PSP Packet Success Probability. 63

QoS Quality of Service. 17, 113

QPSK Quadrature Phase-Shift Keying. 108

RAS Radio Access Station. 37

RFC Request For Comments. 29, 31, 36, 66, 67

RFD Reduced Fonction Device. 31

RNP Required Number of Packet transmission. 62–64

ROA Remotely Operated Aircraft. 11

ROGUE ROutinG protocol for Unmanned systEm. 108, 120, 122, 123, 126, 127, 136–142

ROUV Remotely Operated Underwater Vehicle. 17, 37

RPA Remotely-Piloted Aircraft. 12

RPAS Remotely Piloted Aircraft Systems. 12

RPS Remote Pilot Station. 12

RSSI Received Signal Strength Indication. 59, 61, 64

RSVP Resource ReSerVation Protocol. 17

RTS Request to Send. 50–53

RTT Round Trip Time. 53, 93

RUAS Rotorcraft UAS. 12

RUAV Rotorcraft UAV. 12

SBR-DLP Sector-based routing with destination location prediction. 76

SF link Stability Factor. 63

SF-BATMAN Store and Forward BATMAN. 127

SINR Signal to Interference plus Noise Ratio. 61

SMART MAking pRogress Towards delivery. 72

SN Sequence Number. 59

SNR Signal to Noise Ratio. 44, 61, 63, 102

SPM Social Pressure Metric. 72

SPRR Smoothed PRR. 63

SRCM Semi-Random Circular Movement Mobility Model. 21, 22

SSAR Social Selfish Aware Routing. 72

ST Smooth Turn. 21, 22

T-Lohi Tone Lohi. 53

TBRF Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding. 67

TCP Transmission Control Protocol. 51, 54

TDMA Time Division Multiple Access. 47, 48

UA Unmanned Aircraft. 12

UAANET UAV Ad hoc NETwork. 29, 36

UANET Underwater Ad-hoc Network. 37

UAS Unmanned Aircraft System. 12

UAV Unmanned Aerial Vehicle. 11, 12, 16, 17, 21, 22, 29, 32, 33, 36

UCAR Unmanned Combat Armed Rotorcrafts. 12

UCAS Unmanned Combat Aircraft Systems. 12

UCAV Unmanned Combat Aerial Vehicle. 12

UGCV Unmanned Ground Combat Vehicle. 13, 17

UGS Unmanned Ground System. 13, 16

UGV Unmanned Ground Vehicule. 12, 13, 16, 17, 20, 22, 24, 26, 97

UITT Union Internationale des TélécommunicaTions. 27

UMS Unmanned Maritime System. 14

UMV Unmanned Maritime Vehicle. 14

USSV Unmanned Semi-Submersible Vehicles. 15

USV Unmanned Surface Vehicle. 14, 17

UUV Unmanned Underwater Vehicle. 15, 17

UW-ASN UnderWater Accoustic Sensor Network. 37

UWSN Underwater Sensor Networks. 37

VANET Vehicular Ad-hoc NETwork. 22, 29, 36, 37

VBF Vector Based Forwarding. 75

Wi-Fi Wireless Fidelity. 29, 32

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access. 28, 31, 37

WMEWMA Window Mean Exponentially Weighted Moving Average. 63

WRE Weighted Regression Estimator. 64

WRR Weighted Round Robin. 118

WSN Wireless Sensor Network. 36

ZRP Zone Routing Protocol. 68

Introduction générale

Motivations et contexte de l'étude

L'exploitation des systèmes autonomes aussi appelés "Unmanned system" présente aujourd'hui un intérêt majeur pour de nombreuses applications liées à l'exploration de zones dangereuses et à l'exécution de tâches fastidieuses, par ex. l'inspection de pipelines. Ces systèmes sont composés d'un véhicule qui n'embarque aucun opérateur à son bord (unmanned) ou d'un élément non supervisé (unattended) tel qu'un capteur ainsi que d'un ensemble d'éléments associés tels que la station de contrôle [NIS08]. Alors que les applications actuelles couvrent le domaine spatial, aérien, terrestre et maritime, les véhicules ne peuvent exécuter que des missions précises dans des environnements distincts. Cette limite est principalement due à la conception spécifique des engins afin de garantir la réalisation de la mission assignée. Dans ce contexte chaque véhicule ne peut effectuer qu'un nombre restreint de missions pour lesquelles il a été conçu.

Bien que la pluralité des engins ait permis de couvrir un large domaine d'applications, une nouvelle tendance consiste à faire coopérer différents systèmes afin d'étendre les missions à accomplir. À titre d'exemple, une application de nettoyage de parcs a été développée au sein du LABRI qui fait coopérer des engins terrestres et aériens afin d'explorer, de détecter et de collecter des déchets dans une zone définie. Dans ce contexte, les véhicules coopèrent au sein d'un système unique. Chaque véhicule est assigné à une mission dite locale. Ces missions combinées permettent la réalisation d'une mission plus globale. Cette association de véhicules nécessite le déploiement d'un réseau afin que les éléments du système puissent communiquer entre eux. Néanmoins, la coopération des systèmes nécessite leur interopérabilité.

Des travaux ont été menés récemment dans le but de standardiser les communications. On retrouve notamment des standards militaires tels que le STANAG 4586 [OTA12] qui standardise les messages de contrôle pour les engins autonomes aériens, ou encore le STANAG 7085 [OTA04] qui normalise la couche liaison de données pour les transmissions temps réel de flux vidéo. Ces standards normalisent uniquement des aspects réseaux pour des applications précises. Il existe un standard plus complet appelé Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS) [RW08] qui définit notamment les messages de contrôle et de commandes utilisés. Cette architecture repose sur une couche applicative standardisée qui permet d'échanger des messages sans se préoccuper des couches inférieures. Ce standard a permis de déclencher une dynamique qui s'est traduite par des implémentations logicielles de l'architecture et fait également l'objet de travaux de recherche qui visent à étendre ses fonctionnalités. Néanmoins, il est difficile de déterminer si ce standard sera communément admis dans les systèmes autonomes.

La standardisation de la couche applicative ne permet pas de garantir l'interopérabilité de l'ensemble des systèmes autonomes. Il est donc nécessaire d'étudier les couches inférieures afin d'identifier les challenges associés. Une première investigation menée sur les systèmes terrestres et sous-marins nous montre que les médias de transmission sont différents. Alors que l'utilisation des ondes radio propagées dans l'air revêt un intérêt majeur pour les systèmes de communication terrestres, le caractère dissipatif de l'eau et surtout de l'eau salée provoque une forte atténuation de ces ondes ce qui les rend inopérantes. Le vecteur de transmission le plus adapté dans ce milieu est constitué par les ondes acoustiques qui sont des vibrations mécaniques du milieu de propagation. La nature ainsi que l'environnement de propagation ont pour conséquence d'affecter les

performances de communication en matière de débit, de latence, mais également au niveau de la portée du signal. Afin d'améliorer ces performances des mécanismes et des protocoles spécifiques ont été implémentés au niveau de la couche liaison de données qui ont pour charge le transport d'information entre nœuds voisins. L'importante latence ainsi que la large portée des ondes acoustiques, à la différence des ondes radios électriques, imposent un mécanisme d'accès au média spécifique, tandis que la faible bande passante impose l'utilisation de trames de taille réduite.

La couche réseau dont l'un des buts est de construire un réseau virtuel (via l'adressage logique) se présente comme une approche séduisante pour permettre l'interopérabilité des systèmes. L'adressage Internet Protocol (IP) est actuellement le plus utilisé et permet de s'affranchir de l'adressage physique des interfaces pour segmenter un réseau. L'acheminement des données est assuré par un protocole de routage qui permet de découvrir le meilleur chemin. Néanmoins, les protocoles de routage pour les réseaux sans fil ont des performances limitées lorsque la topologie change rapidement et de manière incessante. Ceci s'explique en partie à la fois par les métriques basées sur la qualité d'un lien qui fournissent une information limitée sur l'état du lien mais aussi par la politique de routage fixe (tolérant ou non aux délais) qui ne s'adapte pas en fonction de la densité du réseau. Du côté des protocoles de routage pour les réseaux sous-marins, nous observons qu'ils reposent majoritairement sur des informations de localisation obtenues via des fonctionnalités spécifiques à l'engin. Cette caractéristique limite le déploiement d'un protocole sur des engins différents. Par ailleurs, le coût des modems acoustiques ainsi que leur consommation énergétique ne permet pas un à engin de supporter différentes interfaces physiques afin de jouer le rôle de passerelle entre deux domaines de routage différents.

L'objectif de ce travail de thèse est de pouvoir développer des applications capables d'être utilisées dans les réseaux de systèmes autonomes hétérogènes. Nous montrons qu'il est possible en développant un protocole de routage qui opère à la fois au niveau liaison de données et réseau d'agréger l'ensemble des systèmes autonomes dans un réseau unique. Ce travail permet d'harmoniser des protocoles de plus bas niveau afin de faciliter la coopération entre les engins. L'acheminement des données se faisant de manière transparente, il permet aux applications de communiquer plus simplement sans se soucier de la topologie physique et logique du réseau. En limitant l'usage d'informations spécifiques à un nœud nous permettons un déploiement générique de notre protocole sans se soucier des caractéristiques des engins. Toute la difficulté consiste à obtenir un routage des données efficaces afin de maximiser le taux de paquets délivrés et minimiser le délai d'acheminement.

Dans le cadre de ce travail, l'étude des métriques basées sur une estimation multiple de l'état d'un lien s'avère être un outil précieux pour permettre aux protocoles de s'adapter à la dynamique du lien. Les techniques d'apprentissage automatique offrent une approche particulièrement intéressante pour permettre l'amélioration du routage des données. Afin de réduire le délai d'acheminement des données nous exploitons les caractéristiques des systèmes autonomes en utilisant une technique d'adressage qui permet d'acheminer les données en anycast et qui est basée sur la nature des engins et de leurs missions. De ce fait, chacun possède un identifiant unique ainsi qu'un identifiant associé au groupe auquel il appartient. Cette technique d'adressage permet d'acheminer les données plus rapidement à un engin en ciblant la destination en fonction de la nature et de l'engin et de sa mission associée.

Plan et contributions

Ce manuscrit s'articule en deux parties. Chacune introduit précisément le contexte et définit les objectifs des chapitres associés. La première partie présente dans un premier temps les systèmes autonomes et les challenges associés, puis décrit l'état de l'art des techniques utilisées afin d'identifier les problématiques réseau liées à la coopération entre les engins. Nous menons dans cette partie une investigation sur la taxonomie des systèmes autonomes ainsi qu'une étude des réseaux de systèmes autonomes en nous focalisant sur les couches physiques, liaison de données et

réseau. Le chapitre 1 décrit la taxonomie autour des systèmes autonomes et identifie les challenges algorithmiques et réseau lorsque les véhicules opèrent seuls ou coopèrent avec d'autres véhicules de même ou de différentes natures. Dans le chapitre 2, nous définissons une mission de référence qui met en valeur les différences notoires entre les systèmes autonomes. Parmi ces différences nous identifions celles concernant la mobilité des engins, les interfaces réseau et les architectures de communication. Dans le chapitre 3, nous nous focalisons sur les couches physiques et liaison de données. Nous montrons les différences entre les systèmes de communication terrestres qui utilisent les ondes radio électriques et sous-marines qui privilégient l'utilisation d'ondes acoustiques. L'étude de la couche physique nous permet de comprendre les phénomènes physiques de propagation du signal et les modèles théoriques associés, afin de les prendre en compte dans nos simulations. L'étude des mécanismes de la couche liaison de données, nous permet de comprendre les techniques d'accès au média et de montrer que les techniques diffèrent dans les réseaux terrestres et sous-marins. Nous nous intéressons ensuite dans le chapitre 4 aux protocoles de routage. Nous montrons qu'il est préférable d'utiliser soit un protocole de type Mobile Adhoc Network (MANET) ou bien Delay Tolerant Network (DTN) en fonction de la densité et de la vitesse des nœuds. Néanmoins, l'algorithme de routage seul ne permet pas de garantir un routage optimal et nous présentons leurs métriques actuelles basées sur une évaluation de la qualité de lien. Les réseaux de capteurs constituent la majorité des applications des réseaux sous-marins. Nous montrons que les protocoles associés utilisent des informations de localisation ce qui ne leur permet pas d'être déployés dans tous les types de véhicules sous-marins. Enfin, nous présentons de manière succincte une modélisation de calcul dans les graphes dynamiques qui nous permettra de décrire de manière formelle le déroulement des algorithmes que nous proposons dans la seconde partie de cette thèse.

Dans la seconde partie de ce manuscrit, nous détaillons les contributions et résultats obtenus dans cette thèse. Dans le chapitre 5 nous proposons une métrique appelée Fast ETX (F-ETX) qui permet d'évaluer la qualité d'un lien et son état dans un réseau mobile. Contrairement aux estimateurs classiques qui utilisent une fenêtre de taille fixe pour constituer l'historique des paquets, notre estimateur de qualité de lien utilise une fenêtre de taille dynamique. Cette taille est dimensionnée en fonction des pertes apparues sur le lien. Pour cela nous avons développé deux algorithmes : l'un porte sur la réduction de la fenêtre, l'autre sur son accroissement. Nous montrons que l'estimateur de qualité est plus réactif et précis que les estimateurs classiques. Cette partie du chapitre est publiée dans l'article :

Sebastien Bindel, Serge Chaumette, Benoît Hilt, "F-ETX : An Enhancement of ETX Metric for Wireless Mobile Networks", *Nets4Cars/Nets4Trains/Nets4Aircraft 2015*, pp.35-46.

Nous avons étendu nos travaux en développant des estimateurs additionnels qui évaluent différentes propriétés du lien. L'estimateur proposé permet d'évaluer précisément l'état du lien et d'anticiper les coupures et l'état unidirectionnel du lien. Cette partie fait l'objet de l'article :

Sebastien Bindel, Serge Chaumette, Benoît Hilt, "A Novel Predictive Link Quality Metric for Mobile Ad-Hoc Networks in Urban Contexts", *ADHOCNETS 2015*, pp.134-145.

Nous décrivons dans le chapitre 6 un protocole de routage DTN pour les réseaux sous-marins. Contrairement aux protocoles classiques conçus pour les réseaux de capteurs qui utilisent des informations de localisation, notre protocole s'affranchit de cette information en se basant uniquement sur la fréquence des occurrences de contact. L'algorithme de routage est basé sur une technique d'apprentissage automatique afin de déterminer si le nœud garde ou transmet le paquet au voisin rencontré en fonction de l'énergie résiduelle du nœud et de sa fréquence de rencontre avec le nœud destinataire. Afin de donner une priorité aux paquets ayant un court délai d'acheminement, les nœuds effectuent une gestion de file d'attente de paquets et utilisent un algorithme d'ordonnancement pour déterminer le nombre de paquets à transmettre au nœud rencontré. Contrairement aux réseaux sous-marins où les nœuds sont répartis de manière éparse, la densité des nœuds terrestres varie fortement en fonction de leur vitesse et de leur nombre. Nous présentons dans le chapitre 7 un protocole de routage dont la politique de routage (MANET/DTN) s'adapte en fonction du contexte. La stratégie de routage de type MANET s'inspire du protocole

BATMAN tandis que l'algorithme de routage DTN s'inspire de celui du chapitre 6. Nous intégrons dans le protocole les estimateurs décrits dans le chapitre 5 afin de détecter et d'évaluer l'état des liens afin de sélectionner la meilleure politique de routage à adopter en fonction du contexte. Cette partie est publiée en partie dans l'article :

Sebastien Bindel, Serge Chaumette, Benoît Hilt, "F-ETX : a predictive link state estimator for mobile networks", *EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications* 16(7) :e3, 20th June. 2016.

Dans le chapitre 8 nous étendons les protocoles de routage décrits dans les chapitres 6 et 7 afin de permettre l'interopérabilité des communications entre les systèmes terrestres et sous-marins. Pour cela nous proposons l'utilisation d'interfaces virtuelles qui permettent d'agréger et de gérer les interfaces radios et acoustiques. Nous avons également conçu un plan de segmentation des réseaux de véhicules autonomes basée sur le type de véhicule et les missions assignées. Cette configuration permet d'exploiter la technique de diffusion en anycast et implique également de modifier les protocoles de routage développés au cours de cette thèse.

Première partie

Contexte & État de l'art

Introduction

L'engouement actuel autour des systèmes autonomes a contribué au développement de nombreuses applications allant du domaine du divertissement au domaine militaire en passant par l'inspection d'ouvrages et de zones dangereuses. Ces systèmes possèdent un degré d'autonomie variable qui est défini comme le niveau d'interaction entre l'opérateur du système et le véhicule. Une bonne compréhension des systèmes autonomes ne se limite pas au degré d'autonomie et s'étend à l'environnement d'opération et aux missions assignées. Les travaux présentés dans cette thèse sur les systèmes autonomes commencent par une étude de la taxonomie détaillée dans le chapitre 1. Elle met en évidence la diversité des environnements dans lesquels évoluent les systèmes (aérien, terrestre, marin ou spatial) et des missions assignées (reconnaissance, d'assaut ou encore de sauvetage). Dans ce chapitre nous montrons que ces systèmes sont "orientés" mission, puisque la conception de chacun est dépendante des missions visées. De plus, certaines d'entre elles nécessitent la coopération de systèmes qui peuvent évoluer dans des environnements distincts (par ex. air et mer).

C'est dans ce contexte que nous identifions les challenges nécessaires à la coopération et à l'interopérabilité entre ces engins. Notre démarche s'appuie sur l'étude des réseaux formés par chaque type de système. Chaque type de réseau possède des caractéristiques propres telles que la mobilité des engins qui le composent ou encore les techniques de communication utilisées. Afin d'identifier ces caractéristiques, nous définissons dans le chapitre 2 un scénario où des systèmes de nature différente coopèrent. Ce scénario nous permet d'identifier quatre caractéristiques majeures des réseaux des systèmes autonomes. (i) La mobilité associée aux différents types d'engins qui influe sur la topologie et sa dynamique. (ii) Les médias de transmission utilisés dans les réseaux terrestres et sous-marins. (iii) Les architectures de communication déployées. (iv) Enfin, nous nous intéressons aux techniques de diffusion utilisées dans les systèmes autonomes.

Des travaux précédents ont permis la mise en place d'une architecture standard applicative appelée JAUS [RW08]. Elle permet de garantir l'interopérabilité des protocoles de la couche applicative, mais ne définit aucun standard concernant les protocoles de plus bas niveau. La solution JAUS ne permet donc pas de garantir l'interopérabilité complète des communications entre des systèmes hétérogènes. C'est pourquoi, nous avons développé des protocoles afin de rendre interopérable les couches de plus bas niveau notamment entre les couches liaison de données et réseau afin de masquer les différentes interfaces physiques utilisées. Toute la difficulté réside donc dans la compréhension des médias physiques et les mécanismes utilisés au niveau de la couche liaison de données.

Alors que les ondes radio sont privilégiées dans les systèmes de communication terrestres celles-ci sont dépréciées dans les communications sous-marines car la conductivité de l'eau limite fortement la propagation de ces ondes. Les ondes acoustiques s'avèrent être le support le mieux adapté à la transmission d'informations dans ce milieu. Comparativement aux performances offertes par les systèmes de communication radio fonctionnant dans le milieu aérien, les débits offerts par les modems acoustiques sont très faibles pouvant descendre jusqu'à une dizaine de kilo bits par seconde. L'atténuation du signal augmente également avec sa fréquence ce qui restreint la bande passante disponible. De plus, la faible célérité du signal acoustique couplée à la distance de communication tend à introduire une latence importante. Dans le chapitre 3 nous détaillons plus précisément les phénomènes physiques de propagation des ondes radios dans l'air et des ondes acoustiques dans l'eau, afin de présenter les différences notables entre ces deux médias. L'utili-

sation d'un média de transmission différent par les systèmes terrestres et sous-marins, implique également des différences notables au niveau de la couche liaison de données. C'est pourquoi, nous focalisons notre attention sur les techniques d'accès au média qui représentent un challenge important dans les réseaux sous-marins où le signal est impacté par une forte latence. Nous nous intéressons également aux mécanismes Automatic Repeat Request (ARQ) utilisés dans ces deux types de réseaux afin de déterminer s'il existe une méthode fiable de transmission de données pour chacun.

Les différences observées au niveau des couches basses limitent l'interopérabilité entre les systèmes sous-marins et terrestres. Par conséquent, nous nous intéressons aux couches supérieures et notamment à la couche réseau. La fonctionnalité principale de cette couche consiste à fournir des mécanismes de communication entre deux hôtes distants. Les techniques de routage en constituent un bloc fondamental. C'est pourquoi, dans le chapitre 4 nous étudions les différents protocoles de routage existants et observons qu'ils sont différents dans les réseaux terrestres et sous-marins. Les contraintes au niveau de la bande passante ainsi que la latence du signal conduisent à réduire au maximum le nombre et la taille des messages utilisés par les protocoles de routage sous-marins. Dans ce chapitre, nous nous intéressons également aux techniques d'estimation de l'état d'un lien qui constitue un bloc fondamental dans les protocoles de routage afin de sélectionner le meilleur lien et donc d'optimiser les performances de communication.

Cette première partie est consacrée au contexte de cette thèse ainsi qu'à l'étude des différences entre les réseaux terrestres et sous-marins. Elle est organisée en quatre parties. Le chapitre 1 présente la taxonomie des systèmes autonomes et décrit les missions que peuvent réaliser ces systèmes lorsqu'ils opèrent seuls ou bien coopèrent avec d'autres systèmes. Le chapitre 2 présente la mission de référence qui nous permet d'identifier les caractéristiques des réseaux associées à chaque système autonome. Le chapitre 3 décrit les différents phénomènes physiques de propagation du signal radio dans l'air et ceux du signal acoustique dans l'eau et montre que ces différences impactent les mécanismes de la couche liaison de données. Enfin, le chapitre 4 présente les différents algorithmes et protocoles de routage ainsi que les techniques de détection et d'évaluation de la qualité d'un lien.

Chapitre 1

Les systèmes autonomes et leurs enjeux

« Qui manque de connaissance est sans cesse à la merci du changement. »

Rémy Belleau

Sommaire

1.1 Introduction	9
1.2 Taxonomie des systèmes autonomes	10
1.2.1 Notions générales	10
1.2.2 Systèmes aériens	11
1.2.3 Systèmes terrestres	12
1.2.4 Les systèmes marins	14
1.2.5 Autres systèmes	15
1.3 Systèmes orientés mission	16
1.3.1 Missions simples	16
1.3.2 Missions de véhicules homogènes	17
1.3.3 Missions de véhicules autonomes hétérogènes	17
1.3.4 Bilan des missions présentées	18
1.4 Conclusion	18

1.1 Introduction

Les avancées technologiques dans le domaine des systèmes autonomes ont eu pour effet une forte croissance du nombre de systèmes développés. La complexité de ces systèmes qui accomplissent de plus en plus de missions ne cesse d'augmenter. Une cause directe est le déploiement de ces systèmes dans des milieux différents tels que l'espace, le domaine aérien, le domaine terrestre et le domaine maritime. Par ailleurs, parce que les systèmes autonomes sont conçus pour effectuer des missions spécifiques, les caractéristiques du matériel et du logiciel répondent à des normes strictes, ce qui entraîne le développement de nouveaux systèmes.

Ce chapitre est consacré à la présentation des systèmes autonomes et répertorie les termes existants pour les systèmes spatiaux, aériens, terrestres, maritimes de surface et sous-marins puis décrit les missions effectuées par ces systèmes. Le référencement et le classement de ces termes ainsi que la description des missions représentent les premières contributions de cette thèse, puisqu'aucun document actuel ne liste de manière exhaustive les définitions concernant les termes du domaine des systèmes autonomes.

Ce chapitre est organisé en deux parties. La première présente les notions générales et la taxonomie relative aux systèmes autonomes. Nous nous intéressons dans la seconde partie aux missions réalisées par les systèmes autonomes.

1.2 Taxonomie des systèmes autonomes

Le déploiement actuel des systèmes autonomes s'étend du milieu spatial au milieu maritime en passant par les milieux aériens et terrestres, ce qui a permis la réalisation de missions hétérogènes. Afin de classer au mieux les différents systèmes, une taxonomie basée sur leurs caractéristiques a été adoptée, mais est en perpétuelle évolution en raison de l'évolution et de la pluralité des systèmes. Néanmoins, l'introduction de nouveaux termes n'est pas toujours justifiée et conduit à fausser la qualité de la terminologie. Ce constat peut être expliqué par la pluralité des termes existants et l'absence de document de référence qui détaille la terminologie de manière précise. Notre objectif dans cette section est de présenter une énumération aussi exhaustive que possible du vocabulaire utilisé dans le domaine des systèmes autonomes. L'énumération proposée contient des termes sélectionnés en fonction leur pertinence afin d'établir un lexique de référence qui sera ensuite utilisé au cours de cette thèse.

1.2.1 Notions générales

Un système autonome est défini par le National Institute of Standard and Technology (NIST) comme un système physique auto-alimenté, assigné à une mission et dont le principal élément, par exemple le véhicule ou le capteur, n'embarque aucun opérateur à bord [NIS08]. À la différence d'un robot, aucun élément mobile n'est requis ; un tel système peut donc être mobile ou statique et inclure un ou plusieurs engins (véhicules) ainsi que des composants complémentaires, comme une station de contrôle. Appelé Unmanned System dans la littérature anglo-américaine, il n'existe aucun équivalent standard dans la langue française. Néanmoins la traduction littérale du terme, système autonome, semble être la désignation la plus adéquate. La définition du NIST permet d'inclure tous les types de systèmes à savoir spatiaux, aériens, terrestres et marins, mais également les munitions et capteurs non supervisés. Toutefois pour être appelé système autonome, la plateforme doit pouvoir être réutilisable après l'accomplissement de la mission assignée, les missiles balistiques ne sont donc pas des systèmes autonomes.

Systèmes vs. Véhicules

Une notion fondamentale dans les systèmes autonomes est la différence entre le système et le véhicule, termes souvent utilisés conjointement. Un système est défini comme un ensemble d'éléments incluant un ou plusieurs véhicules ainsi que les éléments associés. Le véhicule ne représente donc qu'un élément du système et est généralement un engin physique auto-alimenté n'embarquant aucun opérateur à bord. Le choix de l'adjectif (aérien, terrestre, marin, etc.) associé au système dépend de l'environnement dans lequel le véhicule est déployé. Par exemple si un véhicule vole dans un espace aérien, on parlera de véhicule et de système aérien, quel que soit l'environnement où se trouve l'opérateur¹.

Niveau d'autonomie

Comme le précise la définition du NIST, il existe quatre degrés d'interaction entre l'engin et l'opérateur du système, que nous présentons ici par ordre décroissant.

Autonomie totale : dans ce mode d'opération, le système accomplit la mission assignée sans l'intervention d'un opérateur humain. Il doit donc s'adapter aux contraintes opérationnelles et environnementales se présentant à lui.

1. Situé hors du composant principal du véhicule, par exemple le cockpit d'un véhicule aérien.

Autonomie partielle : le mode semi-autonome est celui associé aux systèmes ayant une interaction avec un opérateur. La nature de cette interaction peut varier d'une simple commande provenant de l'opérateur à l'intervention physique de l'opérateur. En dehors de ces phases d'interaction, le système effectue des actions de manière autonome.

Téléopéré : un système est dit téléopéré lorsqu'un opérateur pilote de manière continue le véhicule en utilisant les capteurs de l'engin ou par assignation successive d'objectifs. Ce mode opératoire est généralement utilisé lorsque l'engin évolue hors de la ligne de vue directe de l'opérateur. Contrairement au mode semi-autonome, le système ne peut pas effectuer d'action seul.

Piloté à distance : ce dernier mode correspond aux systèmes dans lesquels l'opérateur contrôle continuellement l'engin qui se situe dans sa ligne de vue directe. Comme pour le mode téléopéré, le système n'est doté d'aucune autonomie, le rendant totalement dépendant de l'opérateur.

Un système autonome est donc constitué d'un ensemble d'éléments qui inclut en particulier un engin auto-alimenté n'embarquant aucun opérateur à son bord et qui est déployé dans un environnement spécifique tel que le domaine aérien, terrestre et marin, afin d'effectuer une mission qui lui a été assignée. La distinction entre le véhicule et le système est un aspect fondamental, puisque on la retrouve dans la terminologie via l'utilisation de termes spécifiques. Le dernier aspect fondamental est le degré d'interaction entre un opérateur et le système. En effet, le terme autonome ou en autonomie est à interpréter avec discernement puisqu'un système autonome peut être piloté à distance, et ce, de manière continue.

1.2.2 Systèmes aériens

On désigne par système aérien tous les systèmes autonomes dont les véhicules évoluent dans une zone aérienne donnée. Ces systèmes sont actuellement les plus médiatisés et les plus utilisés par le grand public et les militaires. Ils couvrent un large champ d'applications allant de la surveillance en passant par la prise de vues jusqu'à l'inspection d'ouvrages d'art. Du côté des applications militaires, on retrouve principalement des engins conçus pour des missions de surveillance et de combat. La terminologie présentée distingue les systèmes et les véhicules.

Drone : ce terme désigne par abus de langage l'ensemble des engins autonomes et ce, quel que soit l'environnement où ils sont déployés, aérien, terrestre et marin. Bien que ce terme soit la désignation la plus couramment utilisée, son utilisation est souvent substituée par d'autres appellations telles que UAV ou RPAS dans le secteur militaire, industriel, scientifique et législatif.

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) : le terme UAV, tel que défini par le Département de la Défense des États-Unis (DoD), désigne l'ensemble des véhicules aériens autonomes [Ger12]. Cette définition indique qu'un UAV est un véhicule aérien ne transportant aucun opérateur à son bord et possédant un degré d'autonomie allant de l'autonomie totale, au pilotage à distance. La définition précise qu'un UAV est un engin réutilisable après la réalisation de sa mission, par conséquent les missiles de croisière et autres projectiles ne sont donc pas considérés comme des UAVs.

Remotely Operated Aircraft (ROA) : parallèlement au terme UAV, le DoD a défini le terme ROA comme désignant les véhicules aériens autonomes qui peuvent intégrer l'espace aérien [DOD04]. L'utilisation de ce terme est donc plutôt employé dans un cadre législatif afin de réglementer l'utilisation des véhicules aériens autonomes dans l'espace aérien. Cependant, la définition manque de précision car le degré d'autonomie de l'engin n'est pas explicitement spécifié. La suite de ce chapitre présente des termes plus précis tels que Unmanned Aircraft ou Remotely-Piloted Aircraft, qui rendent l'usage du terme ROA peu pertinent.

Unmanned Aircraft (UA) : la définition du terme UA donnée par la Federal Aviation Administration (FAA) est similaire à celle d'un UAV. Elle désigne les véhicules aériens n'embarquant aucun opérateur à bord et exclue les engins non-réutilisables, comme les missiles balistiques, de même que les engins non alimentés comme les planeurs [FAA13]. Le terme UA est plutôt utilisé dans le domaine législatif contrairement au terme UAV qui est utilisé de manière plus générale.

Unmanned Aircraft System (UAS) : ce terme est présent dans la terminologie militaire [Ger12] et civile [FAA13] et désigne l'ensemble des systèmes composés d'un ou de plusieurs véhicules aériens ainsi que les composants associés tels qu'une station de contrôle. Les termes UAV, UA et UAS s'utilisent de manière complémentaire pour désigner les engins et systèmes aériens.

Rotorcraft UAV (RUAV) / Rotorcraft UAS (RUAS) : les RUAVs sont une sous-catégorie des UAVs qui regroupe l'ensemble des giravions autonomes [Ken12]. Il existe des termes similaires comme UAV-helicopter[Eis04] ou unmanned helicopter [SSCM05] [SNI05], cependant, ces derniers sont moins utilisés. Sachant que le terme RUAV désigne les véhicules, celui désignant les systèmes intégrant ces véhicules est appelé RUAS [Ken12] pour RUA System.

Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) : défini par l'International Civil Aviation Organization (ICIAO), le terme RPAS désigne les systèmes incluant un véhicule aérien autonome appelé Remotely-Piloted Aircraft (RPA), ainsi que les éléments associés ce qui inclut la station de contrôle (Remote Pilot Station (RPS)) chargée de garantir la sécurité du vol du RPA. Contrairement au terme UAS, la dénomination RPAS est destinée exclusivement à une utilisation législative [ICA12]. La définition stipule qu'un RPA doit pouvoir être contrôlé à tout moment par une station au sol afin de garantir une sécurité suffisante et ce quelque soit le degré d'autonomie de l'engin et son positionnement (vue directe ou non).

Désignations associées aux engins d'assaut : le terme Unmanned Combat Aerial Vehicle (UCAV) est défini par Shetty et al [SSN08] comme une sous-catégorie d'UAV conçus pour des missions d'assaut, pouvant transporter des armes létales. Les systèmes associés sont appelés Unmanned Combat Aircraft Systems (UCAS) [Sch12]. Une sous-catégorie désigne les giravions d'assaut autonomes aussi appelés Unmanned Combat Armed Rotorcrafts (UCAR) [DOD05].

1.2.3 Systèmes terrestres

Les systèmes/engins évoluant sur le sol sont appelés systèmes et engins autonomes terrestres. Utilisés principalement dans le monde du loisir, comme les voitures radio commandées, le nombre d'applications est en perpétuelle croissance et regroupe aujourd'hui le transport autonome, la surveillance ou encore la reconnaissance et le pointage de cibles. Nous complétons cette classe par un nouveau type de système "terrestre", les systèmes souterrains dont l'utilisation concerne principalement l'industrie minière.

Unmanned Ground Vehicle (UGV) : le terme UGV est défini à travers trois documents. Carlson [Car04] décrit les robots terrestres mobiles comme des UGVs. Le degré d'autonomie peut varier de l'autonomie totale au contrôle à distance. Gage [Gag95] donne une définition similaire en considérant les UGVs comme des stations mobiles qui évoluent à la surface terrestre et exécutent une mission. Nguyen-Huu et al. [NHT09] reprennent les définitions données par Carlson [Car04] et Gage [Gag95] en considérant les UGVs comme des véhicules autonomes (quelque soit le degré d'autonomie) embarquant des capteurs et disposant éventuellement d'un système de communication. Un UGV peut donc être défini comme un système physique auto-alimenté pouvant se déplacer (exclusivement) sur le sol terrestre, possédant un certain degré d'autonomie et capable d'interagir avec son environnement. Bien qu'aucun consortium ne définisse officiellement le terme UGV, les précédentes définitions sont suffisamment précises pour que le terme UGV puisse être utilisé.

Unattended Ground Vehicle : utilisé dans une unique référence [NGHD01], le terme Unattended Ground Vehicle signifie littéralement véhicule terrestre non surveillé, à l'inverse du terme Unmanned qui indique l'absence d'opérateur à bord d'un véhicule. L'utilisation du terme Unmanned est donc plus appropriée pour désigner les véhicules, tandis que l'emploi du terme Unattended est plus propice pour les capteurs. Par conséquent, nous considérons l'usage de terme Unmanned Ground Vehicle comme plus pertinent pour désigner les véhicules terrestres autonomes.

Unmanned Ground System (UGS) : les systèmes autonomes terrestres sont regroupés sous l'appellation Unmanned Ground System. Le DoD définit un UGS comme étant un système physique où aucun opérateur humain n'est présent dans le véhicule et qui accomplit les missions qui lui sont assignées [DOD13]. Un système autonome terrestre est donc composé d'un UGV ainsi que des éléments associés tels que les unités de contrôle utilisées par l'opérateur.

Automated Guided Vehicle (AGV) / Automated Guided Vehicle System (AGVS) : le terme AGV regroupe l'ensemble des véhicules autonomes utilisés dans le transport de charges. Ils peuvent être filoguidé ou bien suivre un chemin préprogrammé [GT87]. Peu connus du grand public les AGVs sont largement utilisés dans le domaine industriel et de la santé tel que le transport du matériel médical [Swi13]. Le terme AGVS désigne les systèmes associés [Vis06].

Unmanned Underground Vehicle : peu connus, les véhicules autonomes miniers sont une sous-catégorie de véhicules terrestres conçus pour les milieux souterrains. La littérature en relate quelques utilisations notamment dans le transport minier [WVKV90] [SBC⁺10] mais aussi quelques surprenantes applications comme le RoboClam, un robot biomimétique capable de creuser dans des sols granulaires et cohésifs afin de réaliser des missions telles que le lever d'ancre maritime [WDD⁺10].

Termes spécifiques des engins militaires

Nous poursuivons la présentation des termes relatifs aux systèmes/engins terrestres par une classification dédiée aux engins militaires. Dans ce domaine les termes sont étroitement associés à des projets.

Unmanned Ground Combat Vehicle (UGCV) : le terme UGCV a été introduit par la DARPA pour désigner les engins tout terrain de reconnaissance et de combat développés durant le programme du même nom. Le système associé est désigné par le terme UGCVS pour UGCV system [Tho03].

Le Unmanned Ground Vehicles Joint Programm Office (UGV JPO) : le programme UGV JPO avait pour but de coordonner les travaux de développement des UGVs des entités dépendantes du ministère de la défense. C'est dans ce sens que les travaux menèrent au développement des Tactical UGVs (TUGVs), UGVs utilisés par le corps des Marines des États-Unis à des fins de surveillance, de reconnaissance ou encore de combat. Quatre prototypes furent conçus (i) le Surrogate Teleoperated Vehicle (STV), (ii) Surveillance And Reconnaissance Ground Equipment (SARGE), (iii) le Test-Bed (TTB) et (iv) le GECKO [Gag95].

Le Future Combat Systems (FCS) : l'objectif de ce programme était de développer des UGVs affectés à des missions militaires telles que la détection de mines. Ce programme distingue trois classes d'engins. La classe I correspond aux engins légers, la classe II aux engins de tailles moyennes et la classe III aux engins lourds. La classe I regroupe les UGVs de petites tailles appelés les soldats UGV [DOT04] ou small UGV (SUGV) [LO06] pouvant être embarqués dans le sac des soldats et dont la charge utile peut être modifiée en fonction de la mission. La classe II regroupe les UGVs appelés Multinational Utility, Logistics, and Equipment vehicle (MULE). Il existe un type de MULE spécifique à chaque mission, pour le transport (MULE-T), pour la détection de mines

(MULE-CM), pour la mise en place de relais de communication (MULE Retrans) ainsi que pour les missions de reconnaissance, surveillance, et acquisition de cibles (Armed Robotic Vehicle-Assault Light (ARV-AL)) [DOT04] [LO06]. La classe III regroupe les Armed Robotic Vehicle-Assault (ARV-A) et ARVA-RSTA (Reconnaissance Surveillance Target Acquisition) utilisés pour des missions de reconnaissance ou pour des opérations d'assaut.

Le comité sur l'Army Unmanned Ground Vehicle Technology : ce comité classe les UGVs en fonction de leur degré d'autonomie [TTSC03]. La première classe inclut les Teleoperated Ground Vehicle (TGV) qui sont des véhicules téléopérés pouvant se situer ou non dans la ligne d'horizon de l'opérateur. La seconde classe inclut le Follower UGV (FUGV) et désigne l'ensemble des UGVs évoluant dans une zone précédemment découverte par un soldat ou par un autre engin autonome. La majorité des applications consiste "simplement" à faire suivre un leader (humain ou non) par un FUGV transportant une cargaison; on parle alors de convoi. La troisième classe contient le Semi Autonomous Preceder UGV (SAP UGV) qui contrairement au FUGV possède des fonctions avancées lui permettant d'avoir un degré d'autonomie plus important vis à vis de l'opérateur. Ce type d'engin permet la réalisation de missions complexes telles que la découverte de zones inexplorées. Enfin, la dernière classe contient le Platform-centric Autonomous Ground Vehicle (PC-AGV) qui désigne les UGV autonomes capables de réaliser des missions complexes tout en gardant un niveau d'interaction et de communication minimal avec l'opérateur. Ce type d'UGV est principalement employé pour des missions en milieu hostile pour lesquelles le niveau de communication est faible voir nul. À l'inverse, le Network-Centric Autonomous Ground Vehicle (NC-AGV) opère au sein d'un réseau de communication, capable de relayer des informations et de prendre en compte ces informations pour effectuer de nouvelles tâches durant la mission en cours.

1.2.4 Les systèmes marins

La taxonomie actuelle classe les systèmes/engins en fonction du type de véhicule : (i) de surface, (ii) semi-submersible ou (iii) sous-marin et du système de communication utilisé, filaire ou sans fil. Néanmoins, elle ne différencie pas les engins évoluant en eau douce et ceux évoluant en mer.

Unmanned Maritime System (UMS) : tous les systèmes marins, quelle que soit la nature de l'engin (surface, semi-submersible ou sous-marin) et du mode de communication utilisé (filaire ou sans fil) est considéré comme un Unmanned Maritime System. Le DoD définit un UMS [DOD13] comme un système incluant les véhicules de surface (unmanned surface vehicle) et les véhicules sous-marins (unmanned undersea vehicles), ainsi que le matériel associé pour réaliser une mission. Les véhicules marins sont appelés Unmanned Maritime Vehicle (UMV).

Unmanned Surface Vehicle (USV) : le terme USV désigne l'ensemble des véhicules de surface ainsi que les engins semi-submersibles. Défini par la Marine Américaine, cette classe exclut les engins sous-marins (Unmanned Underwater Vehicles) ainsi que les hydravions [Nav07]. Un USV peut accomplir une mission avec différents degrés d'autonomie allant de l'autonomie totale au pilotage à distance. Un véhicule totalement autonome est désigné dans la littérature comme un Unmanned Surface Vessel (USV) [Man08] ou Autonomous Surface Vehicle (ASV) [Man08] [BCFD07]. Les autres engins (semi-autonomes, téléopérés ou commandés à distance) sont regroupés sous l'appellation Remotely Operated Surface Vehicle (ROSV). Ceci inclut les véhicules qui communiquent avec la station de contrôle soit via un câble, soit avec une technologie de communication sans fil. Un classement additionnel des engins peut être réalisé en fonction des missions qui peuvent leur être affectées. Les USVs utilisés pour des missions de reconnaissance sont appelés Surface Vehicles (URecSVs). Les Combat Surface Vehicles (UCSV) incluent les engins de combat passifs et actifs. Un engin est dit actif s'il intervient durant une mission, en remplissant des objectifs tels que le suivi d'une cible. On utilise le terme passif pour désigner un véhicule utilisé comme

cible par d'autres engins. Il est principalement utilisé lors de missions d'entraînement qui visent à intercepter des engins autonomes. Le dernier type d'engin est le Unmanned Rescue Surface Vehicle (URSV) qui est un véhicule de sauvetage autonome [BCFD07].

Unmanned Underwater Vehicle (UUV) : les UUVs sont définis par la Marine Américaine comme étant des engins auto-alimentés et auto-propulsés entièrement submersibles et ayant un degré d'autonomie allant de l'autonomie totale au contrôle à distance et peuvent posséder un câble pour recevoir et transmettre des données telles qu'une vidéo fournie par la caméra embarquée sur l'engin. Seuls les véhicules entièrement submersibles sont considérés comme des UUVs, ce qui exclut les engins semi-submersibles [Nav] [CW11]. Les véhicules qui possèdent une autonomie totale (actions préprogrammées ou adaptation du système) sont appelés Autonomous Underwater Vehicles (AUV). À l'inverse, les véhicules non autonomes sont appelés ROV pour Remotely Operated Vehicle. Cependant, une interprétation hors contexte de ce terme peut entraîner une confusion parce que le terme ne mentionne pas le type de véhicule concerné, ici les engins sous-marins. Nous préférons le terme ROUV (Remotely Operated Underwater Vehicle), qui désigne l'ensemble des UUVs partiellement autonomes pouvant être téléopérés. Il existe trois appellations en fonction de la mission assignée à l'engin, mission de reconnaissance (Unmanned Reconnaissance Underwater Vehicle (URCUV)), mission de combat (Unmanned Combat Underwater Vehicle (UCUV)) et mission de sauvetage (Unmanned Rescue Underwater Vehicle (URUV)).

Unmanned Semi-Submersible Vehicles (USSV) : Les engins semi-submersibles représentent une sous-catégorie des USVs qui possèdent la particularité d'avoir une partie immergée [BCFD07] [Nav07]. Ils sont appelés Autonomous Semi-Submersible Vehicles (ASSV) [AKSH09] s'ils sont autonomes. Les engins ne possédant pas une autonomie totale sont appelés Remotely Operated Semi-Submersible Vehicle (ROSSV). Les USSVs conçus pour les missions de reconnaissance sont appelés Unmanned reconnaissance Semi-Submersible Vehicle (URCUSSV), ceux de combat Unmanned Combat Semi-Submersible Vehicle (UCSSV) et ceux de sauvetage Unmanned Rescue Semi-Submersible Vehicle (URSSV).

1.2.5 Autres systèmes

Par souci d'exhaustivité, nous décrivons dans cette section les systèmes/véhicules autonomes qui n'entrent pas dans la classification des systèmes étudiés dans cette thèse mais qui sont néanmoins considérés comme des engins ou systèmes autonomes.

Systèmes spatiaux : les engins et systèmes spatiaux sont regroupés sous l'appellation *Spacecrafts* qui désigne l'ensemble des engins qui se déplacent dans l'espace tel que les véhicules ou les satellites [Oxf] [Col] [Gre09]. Nous proposons d'enrichir cette définition existante par la suivante :

Un Unmanned Spacecraft est un vaisseau spatial autonome et auto-alimenté se déplaçant dans l'espace.

Cette définition, plus proche de celle du NIST est plus précise pour désigner les systèmes autonomes spatiaux. Un terme proche, Unmanned Spaceflight, est parfois utilisé dans la littérature [Gre09]. Néanmoins, celui-ci fait référence à l'action de voyager dans l'espace (vols habités) [Oxf] [Col] et est donc moins généraliste que le terme Unmanned Spacecraft. Parmi les sous-catégories des engins spatiaux autonomes, on trouve les engins utilisés pour le réapprovisionnement des stations spatiales, par exemple la station spatiale internationale [NASb] [NASa], les satellites artificiels non pilotés par un opérateur à bord, le télescope Hubble [Gre09] et les sondes spatiales conçues pour l'exploration (incluant les sondes orbitales) et les robots d'exploration tels que le robot Opportunity.

Unattended Systems : Le terme de systèmes non supervisés est apparu dans le programme Future Combat Systems (FCS). Il avait pour but de moderniser le champ de bataille en interconnectant au sein d'un même réseau, des soldats, des systèmes pilotés ainsi que des systèmes autonomes. Le programme incluait trois types de systèmes autonomes à savoir les UAVs, les UGVs et les systèmes non supervisés (unattended). Les systèmes supervisés furent regroupés en trois catégories. La première regroupe les capteurs autonomes (UGS), déployés par des soldats, véhicules ou robots et capables de récolter des informations pour la surveillance, la reconnaissance ou encore l'acquisition de cibles [Fei09]. La seconde regroupe les systèmes Non-Line-of-Sight-Launch Systems (NLOS-LS). Ces systèmes utilisent un système de lanceur appelé launch unit (C/LU) embarquant des instruments de navigation et capables d'auto localiser et de faire feu sur une cible via deux types de missiles, les Precision Attack Munitions (PAM) et les Loiter Attack Munitions (LAM) [DOT04]. Enfin, une dernière catégorie regroupe les Intelligent Munitions Systems (IMS), qui désignent les systèmes permettant de fusionner les données provenant de réseaux de capteurs autonomes ainsi que de systèmes d'armes dans le but d'obtenir des informations sur le déroulement de la mission [DOT04].

1.3 Systèmes orientés mission

À chaque milieu correspond un type de système. La majorité des systèmes sont exclusivement conçus pour effectuer des missions précises avec une possibilité limitée d'étendre la portée d'action de leurs engins. Ces contraintes proviennent des limitations technologiques actuelles qui imposent une conception stricte des engins afin de garantir la réussite des missions assignées. La réalisation de missions complexes impose aussi l'utilisation de différents engins capables d'effectuer une partie de la mission mais cela ne va pas sans poser de problèmes. Afin de mettre en évidence les problématiques et les enjeux actuels, cette section présente différents types de missions réalisables par les systèmes autonomes. La première partie présente des missions simples ne faisant intervenir qu'un seul engin. La seconde présente des missions qui nécessitent l'utilisation de plusieurs véhicules de même type. Enfin, la dernière partie présente des missions faisant intervenir des systèmes hétérogènes qui opèrent dans des milieux différents.

1.3.1 Missions simples

On parle de missions simples lorsque celles-ci sont réalisées par un seul système faisant intervenir qu'un seul véhicule. Bien qu'il existe un nombre important de ce type de système, nous en présentons certains afin d'identifier les problématiques de recherche actuelles.

Samad et al. [SKH⁺13] proposent l'utilisation d'UAVs afin de réaliser des opérations de photogrammétrie en utilisant des données Global Positioning System (GPS) pour connaître les paramètres de navigation de l'engin, c'est à dire son altitude et sa position. Une autre application proposée par Wenqian et al. [ZLWT12] utilise les UAVs pour détecter la présence de pollution maritime. Chi et al. [CMT⁺12] étudient un algorithme de planification de trajectoire pour étendre la couverture des réseaux d'opérateurs mobiles afin de desservir des zones non couvertes. Enfin, Sotheara et al. [SAAS14] proposent d'utiliser un UAV comme une "mule" pour collecter les données d'un réseau de capteurs. Pour cela, les auteurs proposent l'utilisation de techniques de routage permettant de prioriser les données envoyées des capteurs vers l'UAV en fonction sa direction et de sa distance aux capteurs.

Les principales missions réalisées par les UGVs sont des missions d'exploration où les engins se déplacent dans un environnement inconnu et parfois hostile. Dans ce cadre, plusieurs problèmes se posent, concernant principalement la planification de trajectoire, le positionnement et la navigation en milieu inconnu. On trouve un nombre important d'applications qui présentent des techniques et des technologies ayant pour but d'adresser ces problèmes. Dans le cadre de missions d'exploration de volcans, Caltabiano et al. [CMR04] proposent un algorithme de localisation pour les UGVs utilisant les données d'un Differential Global Positioning System (DGPS)

afin de déterminer la position, l'orientation et la distance parcourue par le robot. Dans le même temps, Kurashiki et al. [KFI⁺10] suggèrent un système d'auto localisation combiné à un algorithme de génération de trajectoire dans le cadre de parcours de vergers. De nombreuses autres études mettent en avant des problématiques similaires lorsque les UGVs sont déployés sur des terrains boisés [ZXM⁺12] ou à l'intérieur de bâtiments [ZL13].

Les applications concernant les systèmes autonomes marins bien que moins nombreuses, présentent des challenges similaires concernant l'inspection de zones. Steimle et al. [SMLH09] utilisent des USVs pour accomplir des missions d'inspection du littoral dans le cadre d'opérations post-catastrophes. On retrouve une utilisation similaire des UUVs par Schiavon et al [SFT00] qui utilisent un Remotely Operated Underwater Vehicle (ROUV) pour réaliser des inspections de sédiments. Une autre application porte sur l'inspection d'oléoducs et de câbles sous-marins effectuée par un Autonomous Underwater Vehicle (AUV) [AICR07]. Enfin, les UUVs peuvent être utilisés pour effectuer des opérations de déminage sous-marin [vAAA⁺01].

1.3.2 Missions de véhicules homogènes

Nous présentons dans cette section des missions faisant intervenir plusieurs véhicules identiques. Ce type de mission introduit généralement la notion de flotte ou d'essaim qui définit la configuration topologique formée par les véhicules. On parlera de flotte lorsque les véhicules sont éloignés mais faisant partie d'un même réseau afin de couvrir une zone étendue. On parle d'essaim lorsque les véhicules se déplacent en formation rapprochée. Cette configuration réduit la zone de couverture des engins mais apporte une meilleure connectivité pour les échanges nécessaires à la coordination de l'essaim. Ces configurations posent des problèmes d'algorithmique distribuée concernant notamment la coordination de l'essaim ou de la flotte. On trouve par conséquent de nombreux projets qui visent à les résoudre.

Le projet CARUS (Cooperative Autonomous Reconfigurable UAV Swarm) [CLM⁺11] présente l'utilisation d'un essaim d'UAVs pour surveiller des zones regroupées par des Point Of Interest (POI). Afin de garantir la surveillance de ces POIs chaque engin aérien visite périodiquement les POIs qui lui ont été affectés. L'intérêt principal de CARUS réside dans la capacité des UAVs à se reconfigurer automatiquement lorsque des POIs ne sont plus visités ou lorsqu'un engin est compromis en n'étant plus à la portée de ses voisins. La flotte se reconfigure alors afin de se partager les POIs qui lui ont été assignés. Des problématiques réseau sont aussi présentes comme le montrent Dusza et al. [DW11] qui tentent d'améliorer la transmission des données et des commandes de contrôle en introduisant un nouveau modèle de Quality of Service (QoS) dans le but de gérer la transmission de données concurrentes.

Weng et al. [WCZ⁺08] s'inspirent du système immunitaire, en proposant un algorithme de coordination pour les véhicules de combat autonomes terrestres (UGCV). Chaque engin détermine localement une stratégie visant soit à inspecter une zone et signaler un ennemi soit à suivre un autre véhicule. Thulasiraman et al. [TS14] proposent un algorithme d'allocation de bande passante dans un réseau d'UGVs à grande échelle en utilisant le protocole Resource ReSerVation Protocol (RSVP) pour permettre une allocation dynamique de la bande passante.

Shaukat et al. [SCO13] décrivent un algorithme décentralisé de recherche d'une source acoustique par des AUVs. Leur contribution repose sur deux algorithmes. Le premier est utilisé pour localiser la source acoustique en se basant sur l'intensité du bruit qu'elle génère. Le deuxième est un algorithme de gestion et de maintien de groupe afin de conserver la formation des AUVs. Caiti et al [CCF⁺13] proposent un algorithme décentralisé de localisation au sein d'une flotte coopérative. Pour cela les auteurs définissent un modèle de communication intégrant des messages de contrôle.

1.3.3 Missions de véhicules autonomes hétérogènes

Des véhicules autonomes sont dits hétérogènes s'ils évoluent dans des milieux différents. Cette section présente les missions faisant intervenir de tels véhicules. De nombreux projets prospectifs

soulignent la complexité de la mise en collaboration d’engins hétérogènes. Nous nous proposons dans la suite de ce document de décrire certaines applications et les problématiques de recherche associées.

Dans le cadre de missions faisant coopérer les véhicules UAV/UGVs, Brenda [\[BSFC13\]](#) propose un algorithme de traque permettant à un UAV de suivre un véhicule terrestre (UGV) empruntant un chemin prédéfini. L’algorithme présenté repose sur une centralisation des calculs en utilisant les retours des capteurs de l’UAV (par exemple sa centrale inertielle) et ceux de l’UGV. Langerwisch et al [\[LWT⁺13\]](#) déploient un système permettant de faire coopérer des UAVs et des UGVs afin de réaliser une surveillance de zone de manière coopérative. Le système opère suivant deux scénarios. Le premier définit une approche opportuniste dans laquelle une formation constituée d’UGVs et d’UAVs se dirige vers une destination commune tout en conservant cette même formation. Dans le deuxième scénario des points d’intérêt sont définis et doivent être observés par un groupe de véhicules composé d’UGVs et d’UAVs.

McGillivray et al. [\[MRdS⁺12\]](#) déploient un système au sein duquel coopèrent des engins aériens, maritimes de surface et sous-marins destinés à des opérations de surveillance et d’exploration. Ils démontrent la nécessité d’un protocole de routage DTN et d’une hiérarchie de communication où les ASVs servent de passerelle entre les UAVs et les UUVs.

Steimle et al. [\[SMLH09\]](#) font coopérer des véhicules marins de surface et sous-marins (USVs et UUVs) qui réalisent des missions d’observation dans le cadre d’opérations post catastrophe. La combinaison d’engins permet de palier les limites des véhicules de surface pour explorer les zones inaccessibles, tout en permettant aux USVs de guider les UUVs durant leurs missions d’exploration.

1.3.4 Bilan des missions présentées

Nous avons présenté trois types de missions. Chacun met en valeur des challenges différents, néanmoins dès lors que les missions font intervenir plusieurs engins (homogènes ou hétérogènes) leur coopération devient alors le challenge principal. On observe également que la coopération des engins aériens, terrestres et marins nécessite la mise en place d’une architecture de communication intégrant l’ensemble des engins au sein d’un réseau unique. Celle-ci repose sur l’utilisation d’engins marins de surface qui jouent le rôle de passerelles. La coopération entre les engins aériens, terrestres et marins constitue donc un challenge intéressant, notamment relatif à l’interopérabilité des réseaux des systèmes autonomes.

1.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons décrit les notions fondamentales et la taxonomie relatives aux systèmes autonomes. Le vocabulaire usité provient principalement de la littérature anglophone qui fournit un lexique riche et varié. L’évaluation de la précision des définitions a permis d’en sélectionner et au contraire d’en discriminer certaines aboutissant même à la proposition de nouvelles définitions. Nous observons que la majorité des termes désignent les systèmes en fonction de leurs caractéristiques, e.g. UCAR pour désigner les giravions autonomes, ou en fonction des missions qu’ils peuvent réaliser, par exemple des missions d’assaut, de reconnaissance, de sauvetage. C’est pourquoi les systèmes autonomes peuvent également se classer en fonction du milieu d’opération (air, terre, mer, espace), et potentiellement en fonction de leurs caractéristiques propres et de la mission à accomplir. Enfin, les missions présentées précédemment ont révélé que des challenges et des problématiques associées sont différents lorsque les engins opèrent seuls, en groupe ou avec d’autres engins de nature différente. Nous avons mis en évidence que la coopération est un challenge clé pour permettre la réalisation de missions complexes faisant intervenir des systèmes aériens, terrestres et marins. Cette coopération nécessite l’interopérabilité des communications réseaux des systèmes autonomes. Nous proposons donc d’étudier les problématiques associées dans le prochain chapitre de ce document.

Chapitre 2

Contexte et problématiques

« Thoroughly conscious ignorance is the prelude to every real advance in science. »

James Clerk Maxwell

Sommaire

2.1 Introduction	19
2.2 Mission de référence de cette thèse	20
2.3 Problématiques sous-jacentes	20
2.3.1 Modèles de mobilité	21
2.3.2 Médias de transmission	24
2.3.3 Architecture des réseaux	27
2.3.4 Techniques de diffusion	32
2.4 L'approche proposée	33
2.5 Conclusion	34

2.1 Introduction

La multiplicité des types de systèmes autonomes a permis leur déploiement dans les environnements aériens, terrestres et marins. Chaque système est conçu pour réaliser des missions précises ce qui signifie qu'ils sont élaborés de manière à garantir la réalisation optimale de ces missions. On citera par exemple les contraintes aérodynamiques d'un véhicule aérien liées aux performances de vol, ou l'utilisation d'interfaces de commande spécifiques en fonction de la mission. Parce que la réalisation de certaines missions ne peut être assurée par un seul type de système dans des environnements complexes, la coopération de plusieurs systèmes s'impose. La coopération met donc à profit les capacités des systèmes en les faisant communiquer à travers un réseau, où chacun effectue localement une mission pour permettre la réalisation d'une mission globale.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la coopération entre systèmes aériens, terrestres, marins de surface et sous-marins. Afin de comprendre les interactions possibles entre eux et les enjeux associés, nous définissons une mission de référence faisant intervenir des véhicules hétérogènes opérant dans des environnements distincts. Cette mission nous permettra d'identifier les problématiques concernant la coopération et l'interopérabilité entre les engins. À partir de ces problématiques, nous décrivons les hypothèses établies pour la mission de référence.

Le reste de ce chapitre est organisé en trois parties. La première présente la mission de référence utilisée dans cette thèse. La seconde décrit les problématiques observées à partir du scénario

de la mission. Enfin, la troisième partie décrit l'approche que nous proposons pour résoudre les problèmes identifiés.

2.2 Mission de référence de cette thèse

Lorsqu'une mission ne peut être réalisée par un seul système, la coopération entre plusieurs systèmes devient nécessaire. Pourtant, les véhicules des systèmes associés possèdent des caractéristiques spécifiques telles que leur schéma de mobilité, les protocoles de communication supportés ou les interfaces réseau utilisées, ce qui limite leur coopération. Pour analyser ces contraintes, nous avons défini un scénario réaliste faisant intervenir des engins de natures différentes qui opèrent dans des environnements hétérogènes. Notre scénario met en scène des systèmes aériens, terrestres et marins qui coopèrent afin d'accomplir une mission de déminage réalisée à la fois en zone terrestre et en zone sous-marine. Les opérations de déminage sont effectuées au niveau terrestre par des UGVs et la mission de déminage sous-marine est affectée aux AUVs. Les engins marins de surface jouent le rôle de passerelles de communication entre les AUVs et les UGVs. Ils permettent de récolter les données émises par les engins sous-marins et de les envoyer soit à l'opérateur soit à d'autres engins. L'opérateur peut aussi envoyer des commandes de contrôle afin de superviser le déroulement de la mission. La figure 2.1 montre la configuration formée par les véhicules durant l'exécution de la mission.

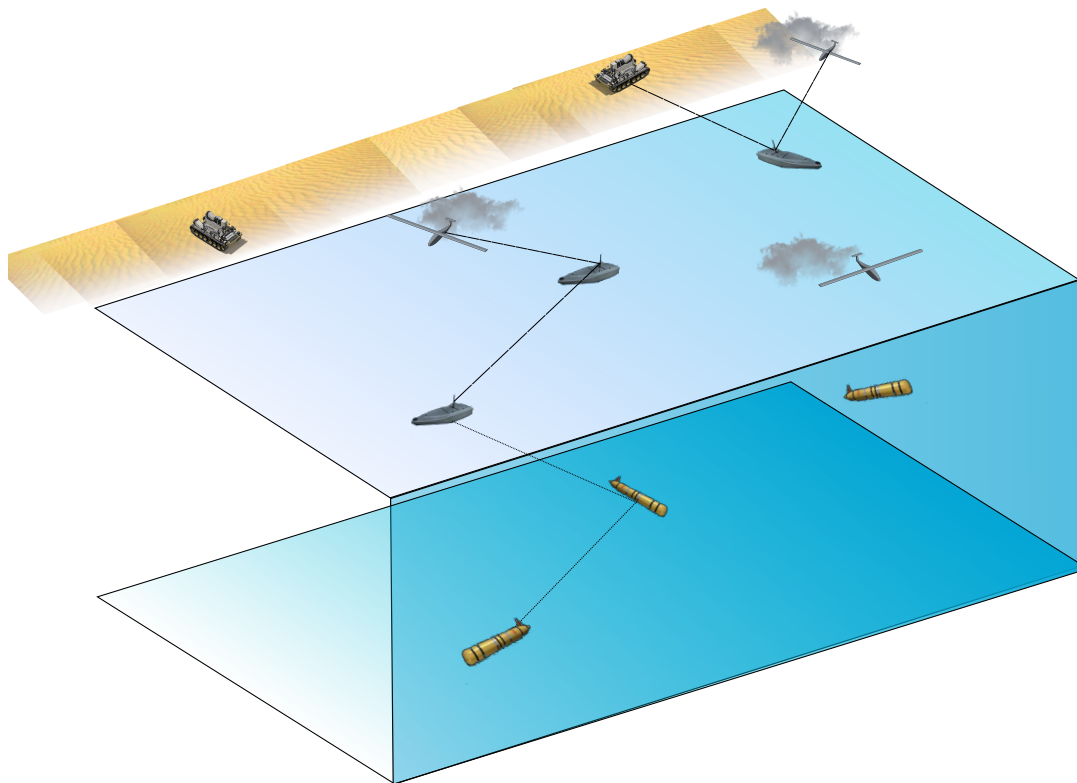


FIGURE 2.1 – Représentation schématique du scénario

2.3 Problématiques sous-jacentes

L'utilisation de systèmes hétérogènes dans le cadre de ce scénario permet de mettre en évidence des problématiques allant de la mobilité des engins aux techniques de détection de mines. Nous nous intéressons ici à la coopération entre les systèmes et donc à leurs interactions et à leur

interopérabilité. Une question se pose donc naturellement : *comment interconnecter différents systèmes qui possèdent des caractéristiques fondamentalement différentes au sein d'un réseau unique permettant à l'ensemble des systèmes de communiquer, afin de leur permettre de collaborer pour la réalisation d'une mission globale*. La solution que nous proposons dans cette thèse repose sur certaines hypothèses et observations. Nous nous intéressons notamment à la mobilité des engins qui jouent un rôle primordial dans les performances des communications, ainsi qu'aux médias de transmission et aux architectures réseaux. L'ensemble de ces observations nous permettra d'établir des hypothèses concernant les réseaux des systèmes autonomes.

2.3.1 Modèles de mobilité

Lorsque les véhicules évoluent dans des environnements distincts, on observe que les engins ont des mobilités différentes. Il est donc essentiel de comprendre ces mobilités à la fois pour connaître les interactions entre les engins, mais aussi pour déterminer quel est le schéma de mobilité le plus pertinent en fonction de la mission assignée à l'engin. Il est néanmoins très difficile d'obtenir des informations sur la mobilité réelle des engins et c'est pourquoi l'on utilise généralement des modèles de mobilité. Ces modèles décrivent mathématiquement la mobilité des engins dans un environnement en deux ou trois dimensions. Nous étudions dans cette section les modèles de mobilité associés aux engins aériens, terrestres et sous-marins.

Modèles pour le domaine aérien

Afin de pouvoir représenter une mobilité réaliste, les modèles de mobilité spécifiques aux UAVs doivent prendre en compte les contraintes des engins aériens telles que la capacité à changer de direction liés à leur aérodynamique, ainsi que les distances de sécurité à respecter. Ils se différencient donc des modèles classiques pour les MANETs tels que le Random Walk où le Random Waypoint [XWK⁺14]. Xie et al. [XWK⁺14] étudient les modèles de mobilité spécifiques (2D et 3D) des engins aériens et présentent les modèles que nous listons ci-dessous comme décrivant une mobilité réaliste. À ces modèles nous en ajoutons un, développé lors des travaux de thèse de Bouachir [Bou14] à l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC). Ces modèles sont :

1. Semi-Random Circular Movement Mobility Model (SRCM) [WGWW10]
2. Pheromone Repel Mobility model [KNT06]
3. Smooth Turn (ST) [WNZF13]
4. Flight-Plan (FP) [TGS⁺08],
5. Multi-tiers Mobility models [BJS10]
6. Paparazzi Mobility Model [BAGL14]

Le modèle SRCM [WGWW10] décrit une trajectoire circulaire d'un engin autour d'un point central. L'engin choisit un point de départ, une vitesse et un angle de rotation pour effectuer une trajectoire circulaire autour de ce centre jusqu'à atteindre la destination fixée. Une fois atteinte, il choisit une nouvelle vitesse, un nouvel angle de rotation et une nouvelle destination, mais garde toujours le même centre de rotation. Ce modèle peut être utilisé lorsque les UAVs effectuent des missions de sauvetage ou de collecte d'informations lorsque la position de la destination finale est connue [XWK⁺14].

Deux modèles [KNT06] ont été spécifiquement créés afin de modéliser une mobilité spécifique aux groupes effectuant des missions de reconnaissance et de patrouille en groupes sans connaître au préalable d'informations sur la zone concernée. Le premier modèle Three-Way-Random se base sur une chaîne de Markov pour déterminer la direction de l'engin qui dépend de la direction de l'engin à l'instant précédent. Le second modèle Pheromone Repel Mobility model se base lui aussi sur une chaîne de Markov et est influencé par les phéromones déposées sur la carte par les engins.

Le modèle ST [WNZF13] représente une mobilité d'engins évoluant dans un espace ouvert où les changements de direction des nœuds suivent une trajectoire semi-circulaire. Il existe une

version "2D" et "3D" du modèle ST. Dans la version "2D", un nœud choisit un point situé sur une droite perpendiculaire à sa direction et tourne autour de ce point suivant un rayon et une vitesse fixe ou aléatoire. Ce modèle est particulièrement adapté pour décrire le mouvement des UAVs effectuant des missions de patrouille et de reconnaissance. Il existe une version "3D" du modèle qui ajoute une composante z qui peut être z -*dependent* où la composante z dépend des coordonnées en x et en y ou z -*independent* si le choix de z se fait de manière indépendante du choix de ses coordonnées en x et en y . La version "3D" permet une description plus réaliste des mouvements des engins. La version z -*independent* décrit de manière suffisamment réaliste les mouvements d'engins civils et commerciaux. La version z -*dependent* quant à elle permet de décrire des mouvements plus complexes où la composante z dépend des coordonnées en x et en y de l'engin. Ce modèle permet donc de décrire la mobilité des engins militaires tels que les avions de chasse.

Dans le modèle FP [TGS⁺08] les UAVs suivent un chemin prédéfini comme par exemple les vols commerciaux qui suivent une route aérienne.

Dans le modèle multi-tiers [BJS10] les engins évoluent dans un même espace aérien où chacun d'entre eux possède une mobilité distincte. Il permet de modéliser le déplacement d'UAVs évoluant dans la même zone, mais exécutant des missions différentes.

Enfin, le modèle Paparazzi [BAGL14] [Bou14] décrit cinq trajectoires : rectiligne, circulaire, ovale, en huit et de type balayage. Dans ce modèle chaque UAV atteint une position spécifique à partir d'un même point de départ via un mouvement rectiligne. Une fois cette position atteinte chaque engin choisit une destination et une trajectoire. La sélection de la trajectoire s'effectue avec une chaîne de Markov où chaque état de la chaîne représente une trajectoire. Ce modèle possède l'avantage de décrire plusieurs types de mouvements, parfois complexes comme le mouvement de type balayage. L'utilisation d'une chaîne de Markov permet de personnaliser les probabilités de transition et donc de modifier l'occurrence d'apparition des trajectoires en fonction de la mission assignée aux UAVs.

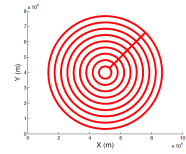
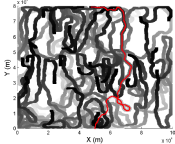
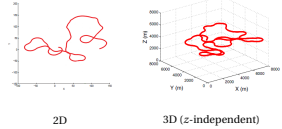
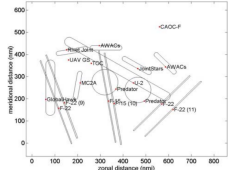
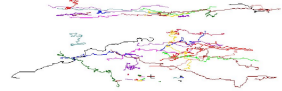
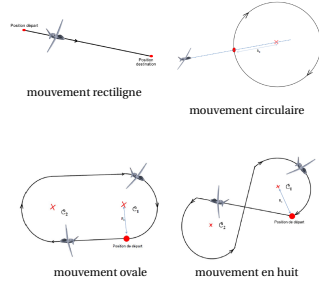
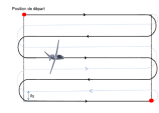
Bilan. Une synthèse des modèles présentés est donnée dans le tableau 2.1. Chaque modèle décrit une mobilité propre et permet de représenter le mouvement des UAVs lors d'une mission spécifique. Par exemple, le modèle SRCM est adapté pour décrire une trajectoire circulaire autour d'un point central fixe, tandis que le modèle ST permet de décrire les mouvements des engins commerciaux et militaires. Le modèle Paparazzi se distingue des autres modèles étant donné qu'il décrit cinq trajectoires différentes qui sont sélectionnées selon une chaîne de Markov. La modification des probabilités de transition de la chaîne de Markov permet d'affiner le mouvement des engins, ce qui rend ce modèle ajustable et permet de décrire des mobilités associées aux missions assignées aux UAVs.

Modèles pour le domaine terrestre

La mobilité des UGVs peut être décrite par des modèles de mobilité dédiés aux MANETs ou aux réseaux véhiculaires (Vehicular Ad-hoc NETwork (VANET)) dans le cas où les véhicules évoluent sur un réseau routier. Les modèles dédiés aux MANETs incluent un large panel allant de ceux aléatoires à ceux décrivant une inspection d'un bâtiment. Au contraire, les modèles consacrés aux VANETs sont plus spécifiques puisqu'ils décrivent uniquement une mobilité véhiculaire sur un réseau routier.

Quatre types de modèles dédiés aux MANETs peuvent être distingués : (i) les modèles aléatoires dans lesquels les nœuds choisissent arbitrairement une destination, une vitesse et une direction. On citera par exemple le modèle Random Walk [CBD02] dans lequel chaque nœud choisit une direction et une vitesse de manière aléatoire après une période. Au contraire, dans le modèle Random Waypoint [CBD02] le nœud marque une pause à chaque changement de destination. (ii) Les modèles à contraintes géographiques décrivent une mobilité contrainte par la présence d'obstacles physiques. Dans le modèle Obstacle [BH], chaque obstacle génère un diagramme de Voronoi qui correspond au chemin à suivre pour éviter les obstacles. Chaque nœud se déplace le

TABLEAU 2.1 – Modèles de mobilité des engins aériens

Modèle	Description	Applications	Exemple de traces
SRCM [WGW10]	Trajectoire circulaire autour d'un centre	Missions de sauvetage et de collecte de données	
Pheromone repel et Three-Way-Random [KNT06]	<i>Three-Way-Random</i> : mouvements influencés par l'instant précédent <i>Pheromone repel</i> : mouvements influencés par les phéromones	Reconnaissance, patrouille, recherche	 <i>Pheromone repel</i> (traces représentant les zones marquées par les phéromones, plus une trace est sombre plus elle est récente)
ST [WNZF13]	Trajectoire semi-circulaire	Patrouille et reconnaissance	 2D 3D (z-independent)
FP [TGS ⁺ 08]	Trajectoire de vol prédéfinie	Vols commerciaux, cargos	 Exemple de trajectoires de vol d'engins militaire
Multi-tiers [BJS10]	Définit un espace aérien comprenant plusieurs engins possédant leur propre mobilité	aéronefs exécutant différentes missions	 Traces d'aéronefs qui évoluent à différentes altitudes
Paparazzi [BAGL14] [Bou14]	Composé de plusieurs sous-trajectoires possibles (rectilignes, circulaires, en huit, ovales et balayages)	Toutes (adaptable par un changement des probabilités des trajectoires)	 mouvement rectiligne mouvement circulaire mouvement ovale mouvement en huit  mouvement en balayage

long des arêtes du diagramme pour atteindre sa destination. Les modèles à contraintes géographiques peuvent aussi décrire une mobilité dans un environnement intérieur, par exemple le modèle Indoor [AEM10] est adapté pour décrire une mobilité liée à l'exploration de bâtiment. (iii) Les modèles à contraintes spatiales décrivent une mobilité des nœuds influencée par la mobilité du voisinage. Dans le modèle Reference Point Group Mobility Model [CBD02] chaque nœud appartient à un groupe composé d'un leader et d'esclaves qui se déplacent en fonction du nœud leader, mais peuvent se déplacer localement (sur une zone restreinte) de manière autonome. Dans un autre modèle nommé Column Mobility [CBD02], chaque nœud se déplace le long d'une ligne (ou colonne) qui représente la mobilité de référence. (iv) Les modèles à contraintes temporelles décrivent une mobilité qui dépend de l'instant précédent. Le modèle de Gauss-Markov [CBD02] permet de décrire la vitesse du nœud selon un processus de Gauss-Markov. Dans le modèle Smooth Random [BH] les nœuds effectuent un changement de direction suivant un virage dont l'angle dépend de la direction choisie et la vitesse du nœud décroît alors dans l'entrée du virage pour s'accroître à sa sortie.

La mobilité des véhicules routiers est plus complexe à modéliser que celle des MANETs, car les modèles doivent prendre en compte la topologie du réseau routier, le trafic (fluide ou apparition de bouchons) et les règles de circulation [HFB09]. Les modèles de mobilités doivent pouvoir décrire de manière précise chaque environnement (urbain, périphérie et autoroutier) qui possède des caractéristiques propres telles que les règles de priorités aux intersections (feu, rond point, priorité à droite) ou encore la possibilité à des véhicules d'emprunter plusieurs voies d'une même route. À titre d'exemple, le modèle Manhattan Grid permet de modéliser un réseau routier, tandis que le modèle Freeway modélise la topologie d'un réseau autoroutier. La gestion du trafic quant à elle fait référence à la capacité du modèle à pouvoir générer un trafic routier de manière réaliste. Pour cela, le modèle doit prendre en compte le comportement des automobiles tel que les distances entre les voitures, la vitesse qui est à la fois dépendante de la limitation de vitesse, mais aussi de la densité de véhicules présente sur la route et enfin les règles dictées par le code de la route notamment la priorité des véhicules dans les intersections. C'est pourquoi il existe des outils spécifiques tels que SUMO [BBEK11] pour définir et générer des schémas de mobilité réalistes.

On remarque donc que les mobilités des engins évoluant sur le réseau routier et hors de ce réseau (par exemple des engins militaires) sont décrites par des modèles très différents. Dans le cadre de notre mission, les modèles dédiés aux MANETs sont plus pertinents pour décrire la mobilité des UGVs évoluant hors du réseau routier. L'ensemble des modèles est décrit dans le tableau 2.2.

Modèles pour le domaine maritime

Dans cette section, nous nous intéressons aux modèles de mobilité des engins maritimes de surface et des sous-marins. Contrairement aux systèmes aériens et terrestres, il existe peu de modèles décrivant la mobilité de ce type d'engins. Néanmoins, les quelques modèles peuvent être classés en deux catégories : (i) les modèles dédiés aux engins marins de surface. On citera par exemple les travaux de Shankar et al. [PKZ⁺08] qui ont développé à partir de traces réelles un modèle de mobilité qui se base sur des couloirs de navigation à sens unique empruntés par les engins maritimes de surface. (ii) L'ensemble des modèles associés aux véhicules sous-marins proviennent de traces réelles capturées sur des véhicules tels que le REMUS ou le Seaglider [Tra15]. Il est possible de spécifier des paramètres propres à ces engins tels que des angles d'inclinaison, la profondeur maximale, vitesse minimale et maximale, l'indice de flottabilité ou encore le coefficient de la pente pour la plongée et la remontée. Un résumé de ces modèles est donné dans le tableau 2.3.

2.3.2 Médias de transmission

Les médias de transmission sans fil permettent aux stations communicantes d'évoluer librement à l'intérieure d'une zone. C'est pourquoi ces médias sont privilégiés par les systèmes au-

TABLEAU 2.2 – Modèles de mobilité des engins terrestres

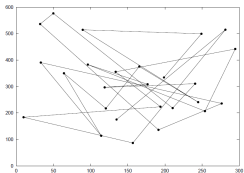
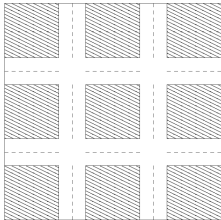
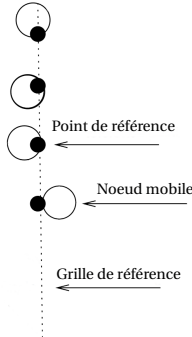
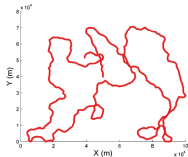
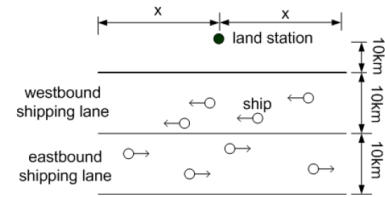
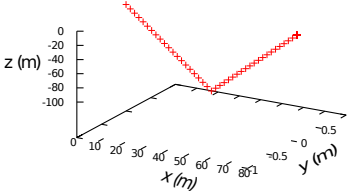
Type de modèle	Description	Modèles associés	Exemple de traces
Aléatoire	Mobilité définie par une vitesse et une destination choisie de manière aléatoire	Random Walk, Random Waypoint, etc.	 Random Waypoint
À contraintes géographiques	Mobilité définie par des contraintes géographiques	Manhattan grid, Indoor Mobility Model, etc.	 Manhattan grid
À contraintes spatiales	Mobilité influencée par la mobilité des nœuds voisins	Reference Point Group Mobility Model, Column Mobility Model	 Column Mobility Model
À contraintes temporelles	Mobilité dans laquelle paramètres sont dépendant des paramètres à un instant précédent	Gauss-Markov, Smooth Random	 Modèle Gauss-Markov

TABLEAU 2.3 – Modèles de mobilité pour les engins marins et sous-marins

Modèle	Description	Exemple de traces
Mobilité spécifique aux engins de surface	Modèle décrivant la mobilité de vaisseaux dans des routes maritimes	 Modèle de mobilité maritime de Shankar et al. [PKZ⁺08]
Mobilité spécifique aux sous-marins	Modèle reconstruisant la mobilité d'AUVs spécifiques (e.g. REMUS, Seaglider)	 Modèle de mobilité du Seaglider

tonomes où les véhicules doivent pouvoir communiquer entre eux mais aussi avec la station de contrôle du système. Il existe différents supports de transmission fil tel que les ondes électromagnétiques ou encore la lumière et qui sont utilisés en fonction de l'environnement où évoluent les véhicules (air, terre et mer). Il est donc naturel de s'interroger sur l'utilisation de ces médias puisqu'ils représentent un point capital pour permettre l'interopérabilité entre les systèmes. Afin de déterminer les médias les plus utilisés nous passons en revue ceux utilisés par les systèmes terrestres et sous-marins puisqu'ils évoluent dans des milieux différents.

Médias de transmission terrestre

Les ondes radios sont actuellement le média de transmission le plus utilisé par les systèmes de communication terrestre. Néanmoins, il existe des applications utilisant d'autres médias comme les liaisons optiques sans fil. Par exemple, Chand et al. [CDA⁺10] ont conçu un système composé d'une station de contrôle et de plusieurs UGVs qui communiquent par transmission optique. Ils montrent que l'emploi des communications optiques en espace libre est adapté pour des réseaux mobiles. Cependant, ce type de communication entre deux nœuds requiert un alignement de l'émetteur et du récepteur afin que le faisceau lumineux puisse atteindre la destination, ce qui constitue le principal défaut des liaisons sans fil optiques. Les ondes électromagnétiques ne présentent pas cet inconvénient et peuvent se propager de manière directionnelle ou omnidirectionnelle en fonction de l'antenne utilisée. Elles possèdent une célérité équivalente à celle de la lumière qui est de 3.10^8 m/s^{-1} dans le cas d'une propagation dans le vide. L'avantage des ondes électromagnétiques est d'offrir un compromis entre la portée et la bande passante qui dépendent de la longueur d'onde et la largeur de bande utilisée. Une onde radio est classée en fonction de sa fréquence (Hz) et l'ensemble de ces fréquences constitue le spectre radiofréquence. Les systèmes de communication actuels pour les applications mobiles terrestres utilisent les ondes hyperfréquences, autrement dit les micro-ondes¹. Ces systèmes de communication fournissent une bande passante élevée et supportent une grande diversité de trafic, tout en bénéficiant d'une couverture importante allant de la centaine de mètres à quelques dizaines de kilomètres. Afin de satisfaire les besoins des applications en terme de débit, des technologies ont été développées puis stan-

1. La majorité des systèmes de communication utilisent des fréquences comprises entre 2.46Ghz et 5.9Ghz.

dardisées par des organismes tels que l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ou encore l'Union Internationale des TélécommunicaTions (UITT) qui définissent à la fois les caractéristiques physiques du signal, sa modulation et l'architecture de communication associée.

Médias de transmission maritime

Bien que les ondes radio soient privilégiées dans les communications sans fil terrestres, leur utilisation est très limitée dans les transmissions sous-marines. En effet, la conductivité de l'eau et plus particulièrement celle de l'eau salée rend le milieu dissipatif vis-à-vis de ces ondes, provoquant une forte atténuation du signal [Lur98] [SZT04]. Quelques travaux utilisent d'autres technologies de communication telles que l'infrarouge en modifiant les interfaces réseaux, mais ces technologies ne permettent de communiquer que sur de faibles portées (1-2m) avec de faibles débits (57 kbits/s) [SZT04]. Fait et al. [FCF⁺06] proposent un système de communication optique pour les AUVs évoluant en eau claire (eau profonde) où les stations peuvent communiquer avec une portée d'une centaine de mètres et avec un débit de l'ordre du Mbits/s.

La facilité de propagation des ondes acoustiques dans le milieu aquatique est connue depuis longtemps, mais leur utilisation n'est que très récente. Elles permettent de communiquer dans les milieux grands et petits fonds et offrent une portée importante de l'ordre du kilomètre, mais avec une bande passante est très faible de l'ordre du kbit/s. La célérité de ces ondes dans le milieu marin est de l'ordre de 1.5×10^3 m/s, soit cinq fois inférieure à la vitesse d'une onde radio dans le vide (3×10^8 m/s). La faible célérité du signal associée à son importante portée a pour résultat de générer une latence importante. Une forte atténuation du signal peut également être observée qui est inversement proportionnelle à la fréquence porteuse, ce qui tend à limiter fortement la bande passante. La profondeur du milieu marin ("deep/shallow water") joue un effet significatif sur la qualité du signal comme le montre Stojanovic [Sto03] et Akyildiz et al. [APM04].

2.3.3 Architecture des réseaux

Les systèmes de communication terrestres privilégient les ondes radios tandis que les systèmes sous-marins utilisent pour des raisons d'efficacité les ondes acoustiques. Les médias de transmission sont généralement utilisés au sein d'architectures réseaux. Néanmoins, il n'existe pas toujours une infrastructure pour interconnecter les engins autonomes, qu'ils soient aériens, terrestres ou sous-marins. Dans ce cas particulier, un réseau est créé à la volée aussi appelé ad-hoc où chaque engin participe au fonctionnement du réseau. Nous étudions dans cette partie les différentes architectures réseaux sans fil et les technologies associées.

Architectures des réseaux terrestres

Les réseaux terrestres sont couramment classés en fonction de leur étendue géographique. On distingue les réseaux étendus (WAN), métropolitains (MAN), locaux (LAN) et personnels (PAN). Dans le domaine du sans fil, chacun de ces types de réseaux utilise une technologie de transmission dédiée.

Réseaux étendus : les réseaux étendus incluent les réseaux couvrants des zones étendues tels que les réseaux satellitaires, figure 2.2a et cellulaires 2.2b. Les réseaux satellitaires permettent de couvrir d'immenses zones géographiques offrant ainsi un canal de communication disponible même si une station se situe dans une zone sans infrastructure de télécommunication. Utilisés à l'origine pour offrir des services de téléphonie, leur utilisation s'étend désormais aux transmissions de flux de vidéos et aux services d'accès à Internet. Il existe deux types de satellites : le premier, géo-stationnaire, qui permet de couvrir des zones fixes ; le second, orbital dans lesquels les satellites suivent une orbite autour de la terre [WU97]. Malheureusement, le coût de déploiement des satellites, la dégradation de la qualité du signal dans certains environnements tels que le milieu urbain et avec un délai plus long que dans les réseaux sans fil classiques (Wi-Fi, LTE, WiMAX)

et la centralisation des communications constituent des inconvénients majeurs de ces réseaux. Pour bénéficier d'un accès au réseau, chaque engin doit également être dans la ligne de visée du satellite ce qui présente un inconvénient majeur dans le milieu urbain où le signal est très fortement perturbé.

Les réseaux cellulaires ont été mis en place par les opérateurs de télécommunication afin de fournir un service de téléphonie à des utilisateurs mobiles. L'évolution des réseaux cellulaires (2G, 3G, 4G) a permis d'offrir de plus en plus de services, grâce à l'augmentation de la bande passante et à la présence de liens de communication de meilleure qualité. La zone de couverture appelée cellule est assurée par des bases de transmission appelées Base Transceiver Station (BTS) (2G), Node B (3G) ou evolved Node B (eNode B) (LTE). Elles sont réparties afin de couvrir un territoire de manière optimale tout en évitant les interférences entre les cellules. La gestion de l'itinérance du client est géré par un mécanisme de transfert de trafic intercellulaire nommé handover. Quatre mécanismes de transfert intercellulaire sont à distinguer. Le premier, vertical, désigne le changement de technologie lors de la migration du client, par exemple de la technologie GSM à LTE. Le second, horizontal, se produit lorsque l'itinérance est assurée par la même technologie. Le troisième, hard, rompt le canal de communication avec la cellule avant l'établissement de la liaison avec la prochaine cellule. Le dernier, soft, maintient le canal qui est utilisé pendant qu'un nouveau canal de la cellule adjacente est acquis. L'inconvénient majeur de ce type de réseau est qu'il repose sur le déploiement coûteux d'une infrastructure centralisée qui ne couvre pas, pour des raisons financières, l'ensemble du territoire, comme le montre l'Autorité de Régulation des Communications Electronique et des Postes (ARCEP) [ACE14].

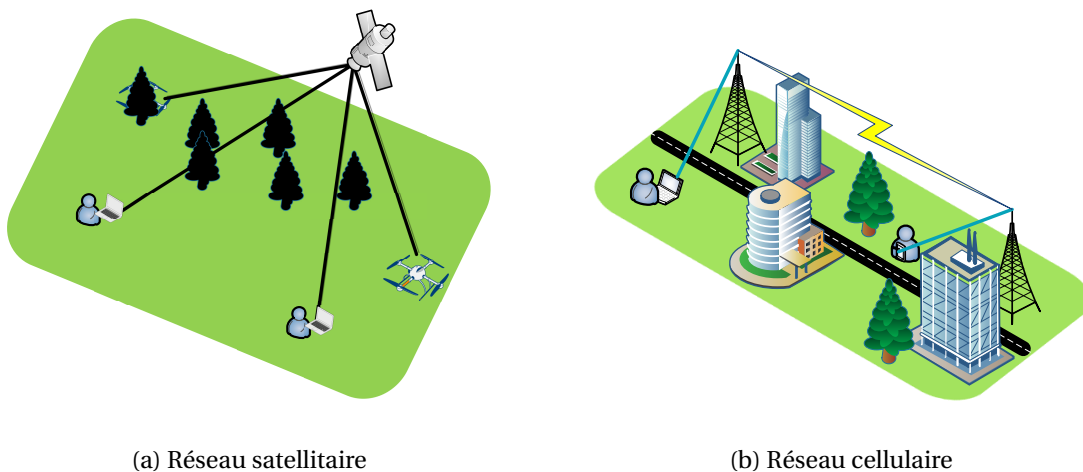


FIGURE 2.2 – Topologie des réseaux étendus

Réseaux métropolitains : Les réseaux métropolitains désignent les réseaux qui couvrent des territoires de la taille d'une ville. La principale technologie de type MAN en sans fil est l'IEEE 802.16/WiMAX, figure 2.3. Le terme Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) désigne le matériel qui met en œuvre la norme IEEE 802.16, qui standardise la couche MAC (c.f. modèle TCP/IP) [PLMD12]. L'architecture du WiMAX est similaire à celle d'un réseau cellulaire et est composée d'un équipement central appelé Base Station (BS) qui offre un service d'accès aux appareils mobiles, aussi appelés Mobile Station (MS). L'intérêt du WiMAX réside dans l'étendue de la couverture du réseau, jusqu'à 10 km pour le 802.16e et 100 km pour le 802.16m, les débits offerts, 63Mbps pour le 802.16e et jusqu'à 1 Gbps pour le 802.16m et la gestion de l'itinérance des clients mobiles [PTLD09] [Fil08]. Il permet donc d'offrir une couverture réseau importante et de supporter une grande diversité de trafic incluant les communications sécurisées et les trafics voix, vidéos et données. Cependant, le faible déploiement du WiMAX sur le territoire français ainsi que son coût représentent aujourd'hui les inconvénients majeurs de cette technologie.

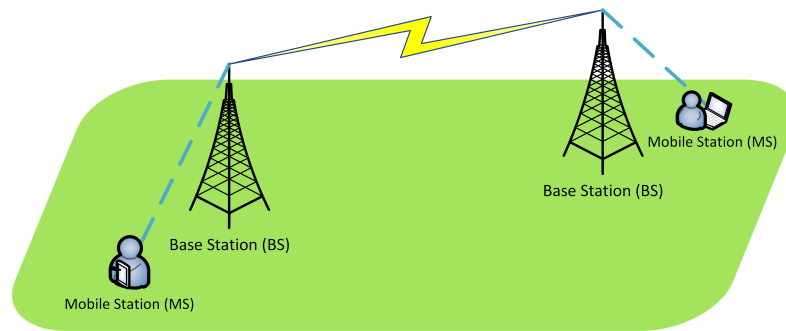


FIGURE 2.3 – Topologie des réseaux WiMAX

Réseaux locaux : les réseaux sans fils locaux couvrent une zone limitée telle qu'une entreprise, un foyer ou encore un espace public. On distingue principalement deux types de réseau local à savoir l'IEEE 802.11/Wi-Fi et la technologie HiperLan.

Le terme Wireless Fidelity (Wi-Fi) désigne le matériel qui implémente la norme IEEE 802.11, qui elle-même standardise la couche Media Access Control (MAC). L'évolution de cette technologie au fil des amendements proposés, a [IEE99], b [IEE00], g [IEE06] ou encore ac [80213] a permis d'augmenter la portée et les débits des communications ce qui a contribué à la popularité de cette technologie auprès du grand public. Un réseau sans fil Wi-Fi peut fonctionner en mode infrastructure où en mode ad-hoc comme le montre la figure 2.4. Dans le mode infrastructure, le réseau a une topologie en étoile dont l'élément central est le point d'accès du réseau, auquel les stations mobiles s'associent pour accéder au réseau. L'inconvénient majeur de cette architecture centralisée est que la disparition du point d'accès entraîne l'effondrement du réseau, mais elle permet une gestion du réseau plus simple du réseau puisque tout le trafic transite par le point d'accès.

Le second mode de fonctionnement, appelé ad hoc, figure 2.4b permet de créer un réseau spontané et décentralisé entre des stations qui peuvent communiquer directement lorsqu'elles sont dans la portée de l'une et de l'autre. Les stations utilisent une technique de communication dite multi-sauts, où l'information est échangée de proche en proche jusqu'à atteindre sa destination finale. Le concept de réseau ad hoc a fait émerger la notion de MANET qui est définie dans la Request For Comments (RFC) 2501 [CM99]. Un MANET est un réseau dont la topologie est dynamique et où la durée de vie des nœuds dépend des batteries embarquées. À partir du concept de MANET, d'autres concepts ont été développés tels que le concept de VANET (réseau véhiculaire), de Flying Ad-Hoc Network (FANET) [BST13] ou encore de l'UAV Ad hoc NETWORK (UAANET) [Bou14] qui désignent les réseaux formés par des UAVs.

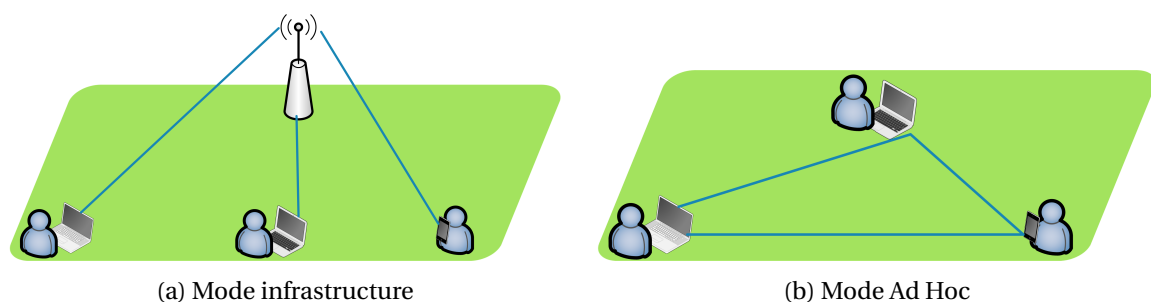


FIGURE 2.4 – Topologie des réseaux Wi-Fi

La norme IEEE 802.11 définit la possibilité de créer des réseaux maillés dont les caractéristiques sont décrites dans l'amendement IEEE 802.11s [IEE11a]. Les réseaux maillés ont pour objectif d'étendre la couverture d'un réseau filaire à l'aide d'entités sans fil. Dans ce type de réseau, on distingue trois types d'éléments. Les clients mobiles qui utilisent le réseau maillé, similaires aux clients dans le mode infrastructure du Wi-Fi. Les nœuds mesh qui assurent le service de maillage et les nœuds passerelles qui permettent d'interconnecter le réseau maillé à un réseau de raccor-

dement, généralement filaire. La structure de ce réseau, illustrée par la figure 2.5 repose donc sur un maillage qui doit être connexe, ce qui limite la mobilité des nœuds mesh à des déplacements ponctuels sur de petites distances.

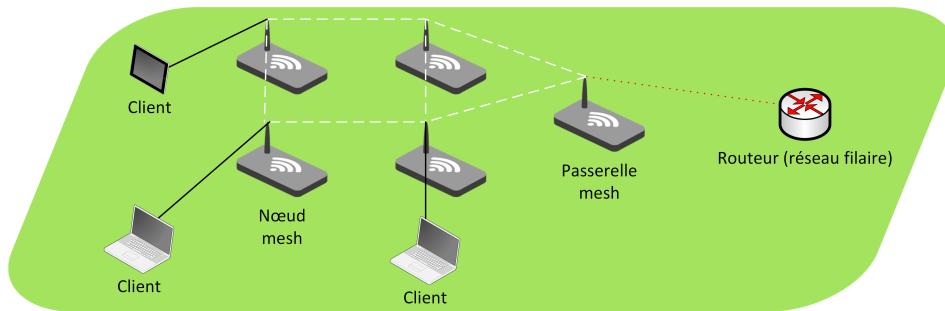


FIGURE 2.5 – topologie des réseaux maillés sans fil

Enfin, HiperLan est une technologie concurrente de l'IEEE 802.11. Standardisée par l'European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Les réseaux HiperLan peuvent fonctionner autour d'un point d'accès ou bien être décentralisés (ad-hoc). Quatre versions d'HiperLan sont à dénoter, chacune utilisée pour une application particulière (réseau local sans fil, boucle point à point, etc.) et offrent des débits et une portée de communication différente. Cependant, cette technologie est peu répandue et peu utilisée en comparaison de l'IEEE 802.11.

Réseaux personnels : les réseaux personnels regroupent les réseaux couvrant une zone limitée de quelques mètres. On distingue principalement deux technologies : l'IEEE 802.15.1/Bluetooth et l'IEEE 802.15.4/(Zigbee/6LowPan).

Le Bluetooth est un standard de communication qui se base sur l'IEEE 802.15.1 [IEE05] qui normalise la couche MAC. Le 802.15.1 permet d'offrir un débit relativement important (24Mb/s pour le Bluetooth 4.0) sur de faibles distances de l'ordre d'une vingtaine de mètres (théorique max 100m). Un réseau est créé dès lors que deux entités peuvent communiquer ensemble; on parle alors de piconet (fig 2.6a). Un piconet définit un unique nœud maître qui autorise les nœuds esclaves à se joindre au réseau. Lorsque plusieurs piconets se connectent entre eux, on parle de scatternet (2.6b). Il est donc possible de construire un pseudo réseau ad hoc avec un scatternet en agrégeant différents piconets, chaque nœud pouvant être à la fois maître dans un piconet et esclave dans un autre [FP05].

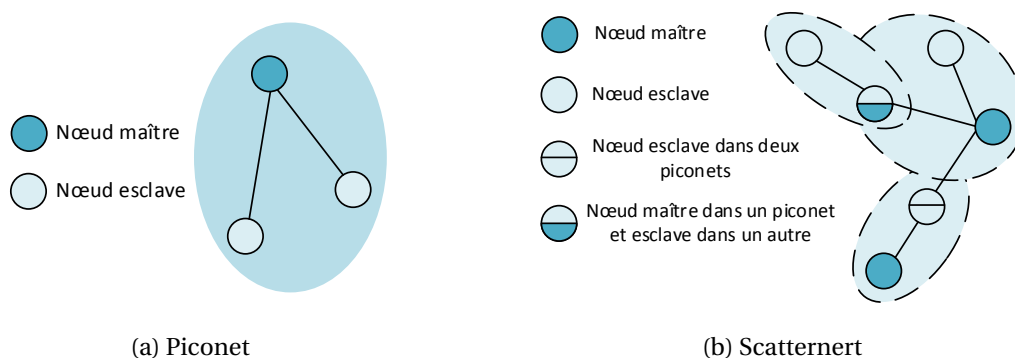


FIGURE 2.6 – Topologie des réseaux Bluetooth

L'autre standard le IEEE 802.15.4 [IEE11b] définit les caractéristiques de la couche (MAC) des réseaux personnels à faible débit (Low Rate -Wireless Personal Area Network (LR-WPAN)). L'évolution de ce standard au fil des amendements proposés a permis d'offrir une amélioration du débit ainsi qu'une portée de transmission supérieure à celle de la technologie IEEE 802.11 [SRK10]. Le standard définit deux types de nœuds, les Full Function Device (FFD) capables de supporter

toutes les fonctionnalités du réseau et les Reduced Function Device (RFD) qui sont des nœuds ayant des fonctionnalités limitées, par exemple en mémoire ou en énergie. Un réseau 802.15.4 peut être construit selon deux topologies distinctes. La première, en étoile (fig 2.7a) dans lequel les communications transitent uniquement via des Personal Area Network (PAN) (effectué par des FFD) qui ont pour rôle d'initier, de terminer et de router les communications. Une autre architecture consiste en la formation d'un réseau pair à pair (fig 2.7b). Dans cette topologie tous les FFD peuvent communiquer entre eux tandis que les RFD communiquent seulement avec un coordinateur PAN (tâche effectuée par un FFD). Ce mode de configuration permet de former des réseaux ad-hoc dans lesquels les nœuds FFD jouent le rôle de routeurs. Néanmoins, si des nœuds RFD sont présents, des groupes doivent être formés autour des FFD afin de garantir l'interconnexion entre tous les appareils [IEE11b]. On retrouve dans la littérature deux standards qui visent à adapter et implémenter le 802.15.4. Le premier, le 6LowPAN est le résultat d'un groupe de travail de l'Internet Engineering Task Force (IETF) qui propose une adaptation du protocole IPv6 dans les réseaux personnels sans fil afin de permettre à des interfaces conçues pour les réseaux personnels d'être interconnectées plus facilement avec d'autres réseaux IP comme Internet. Les principes de ce standard sont décrits dans les RFC 4919 [KM07] et 4944 [MKHC07]. Le second est développé par la Zigbee Alliance qui est une association d'industriels développant une interface de communication sans fil fiable, à faible coût et ayant une faible consommation d'énergie. Les interfaces dites "ZigBee" respectent ce standard et s'appuient sur le standard 802.15.4 pour la couche MAC. Contrairement à la norme 6LowPAN qui standardise la couche réseau, la Zigbee Alliance normalise toutes les couches exceptées celles du 802.15.4 [BPC⁺07].

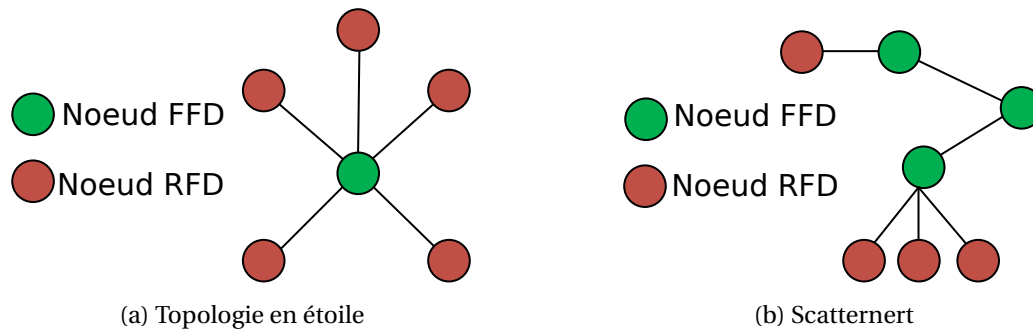


FIGURE 2.7 – Topologie des réseaux 802.15.4

Il existe une version maillée des protocoles personnels qui est définie par le standard 802.15.5 [IEE09]. Ce standard décrit les mécanismes nécessaires pour déployer ce réseau à une grande échelle et introduit la formation d'une topologie sous forme d'arbre, ainsi que des mécanismes de retransmission pour relayer les messages de bout en bout [LZZ⁺10]. La mise en place de cette infrastructure maillée repose néanmoins sur une très faible mobilité des nœuds du réseau.

Discussion En ce qui concerne les architectures des réseaux terrestres, les réseaux étendus possèdent une infrastructure durable et éprouvée, qui se base sur des éléments centralisateurs. Néanmoins, ces réseaux ne garantissent pas une couverture complète d'un territoire. Par exemple, les réseaux cellulaires ne couvrent pas l'ensemble du territoire français; ceci est principalement dû à une question de coût. De leur côté, les réseaux satellitaires imposent que les engins soient être dans la ligne de visée des satellites, ce qui limite leur utilisation en milieu urbain. Ces solutions ne peuvent donc pas être utilisées dans le cadre notre mission de référence. La technologie Wi-MAX quant à elle est trop peu déployée pour permettre l'interconnexion entre différents systèmes autonomes terrestres. Au contraire, les réseaux locaux et personnels sont largement utilisés. Ils peuvent être déployés à la demande ce qui rend leur utilisation flexible et dynamique. Ils offrent la possibilité de déployer des réseaux décentralisés dans lesquels chaque station participe au fonctionnement de l'ensemble. Toutefois, le déploiement d'un réseau maillé ne peut être considéré comme viable, car les nœuds faisant partie du maillage ne doivent présenter qu'une mobilité li-

mitée. Dans le cadre de notre mission de référence, nous privilégions la technologie 802.11/Wi-Fi qui offre un compromis entre performance et efficacité énergétique comme le montre le tableau 2.4.

TABLEAU 2.4 – Comparaison des architectures de réseaux terrestres

Types de réseaux	Étendus	Métropolitains	Locaux	Personnels
Standards	3GPP	802.16	802.11	802.15
Efficacité énergétique	+	+	++	+++
Bande passante	++	++	+++	++
Portée de communication	+++	+++	++	++

Architectures des réseaux sous-marins

Les réseaux sans fil sous-marin acoustiques ne bénéficient pas du même niveau de standardisation que les transmissions radios terrestre. Toutefois, plusieurs initiatives ont été lancées pour normaliser les communications acoustiques sous-marines. Freitag et Singh [FS00] publient les spécifications de la couche physique utilisée par le modem acoustique WHOI, telles que l'utilisation du protocole standard NMEA 0183 pour configurer le modem. Ces spécifications ont ensuite été reprises par le fabricant Benthos pour concevoir des modems compatibles [FGS⁺05]. Le centre de recherche maritime de l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN) a conçu un standard pour les communication acoustiques sous-marines appelé JANUS [PAG⁺14]. Il définit uniquement les caractéristiques des couches basses (PHY et liaison de données) du modèle OSI. Dans le même temps, l'organisme de l'International Organization for Standardization (ISO) développe actuellement un modèle standard pour réseaux de capteurs acoustiques sous-marins [ISO]. L'absence de standard n'a certes pas permis l'émergence d'une technologie. Néanmoins, de nombreux systèmes de communication acoustique sous-marins utilisent le modem WHOI. Par conséquent, les spécifications de ce modem ainsi que les protocoles associés peuvent être considérés comme un standard.

2.3.4 Techniques de diffusion

L'adressage des stations d'un réseau permet d'identifier de manière unique chaque station ou bien un ensemble d'entités (groupe). Il est alors possible de diffuser une information en point à point ou bien à un ensemble de nœuds, en fonction du besoin des applications. Quatre types de diffusion sont à distinguer : la diffusion Unicast (fig 2.8a) qui permet de diffuser une information à une entité unique du réseau, autrement dit en point à point, la diffusion Broadcast (fig 2.8b) qui permet de diffuser une information à toutes les stations d'un réseau (physique ou virtuel), la diffusion (iii) Multicast (fig 2.8c) qui permet de diffuser une information d'une source à un ensemble de récepteurs appartenant à un même groupe. Cette opération nécessite la gestion de groupes afin de gérer les adhésions des nœuds à un groupe ; enfin, la diffusion Anycast (fig 2.8d) permet de diffuser une information d'une source à une destination choisie dans un groupe en fonction de critères spécifiques comme la destination la plus proche ou la plus disponible.

La technique de diffusion Unicast est la plus utilisée, car elle permet d'adresser les entités de manière unique. Néanmoins, l'envoi de messages de signalisation comme ceux utilisés par les protocoles de routage pour la découverte de voisinage se fait en Broadcast afin d'être traitée par tous les nœuds du réseau. On constate plus rarement l'utilisation du Multicast et de l'Anycast dans les réseaux de systèmes autonomes, même si on trouve quelques exemples dans la littérature. Danilov et al. [DHG⁺09] expérimentent un système de surveillance où les UAVs sont équipés de caméras dans le but de transmettre la vidéo de zones surveillées à un système au sol composé de routeurs

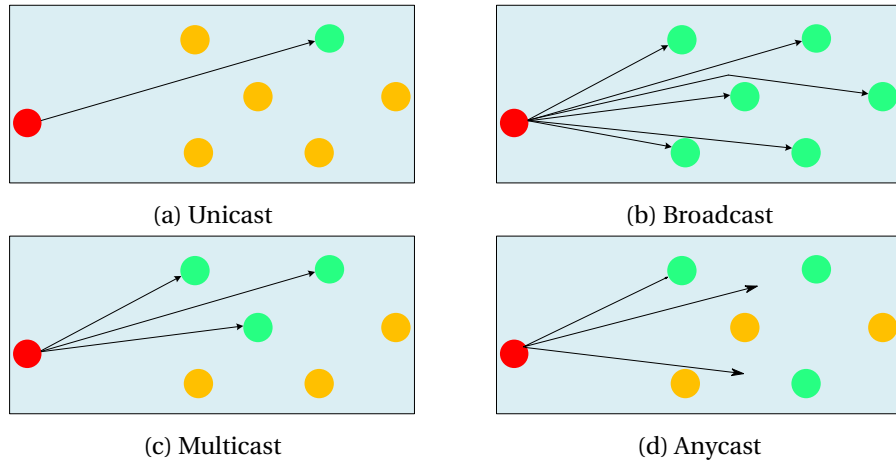


FIGURE 2.8 – Les techniques de diffusion

statiques et mobiles qui ont pour rôle de retransmettre ces données à un serveur central. Le système proposé utilise à la fois les techniques Anycast et Multicast. Brown et al. [BAD⁺04] utilisent la technique Anycast pour transmettre des paquets entre les UAVs et une station de contrôle. L'architecture repose sur le déploiement de nœuds fixes qui permettent de créer un lien entre la station de contrôle et les UAVs. L'envoi de données d'un UAV à la station se fait en Anycast pour atteindre n'importe quel nœud fixe afin que les données puissent être transmises à la station de contrôle.

2.4 L'approche proposée

Les problématiques exposées dans ce chapitre ont montré la diversité des modèles de mobilité, des médias de transmission et des types de réseaux déployés. Ces différentes problématiques ont été observées à partir du scénario de la mission de référence que nous avons proposée et sont autant d'obstacles à l'interconnexion des systèmes autonomes et donc à leur coopération. L'interconnexion des systèmes permet aux différents engins de pouvoir communiquer entre eux et donc d'acheminer des données de bout en bout. Nous proposons dans cette thèse un protocole de routage qui abstrait la présence d'interfaces de communication différentes et repose sur l'utilisation d'un plan d'adressage Unicast et Anycast afin d'acheminer au mieux les données. L'approche proposée repose sur des hypothèses que nous décrivons ci-dessous.

(i) L'utilisation d'une infrastructure de communication implique une architecture centralisée dans laquelle un nœud supervise l'accès au réseau. Cette solution ne peut être viable pour le problème qui nous concerne, car les entités sont mobiles et peuvent être déployées dans des environnements différents. Il est donc indispensable d'utiliser un réseau sans infrastructure appelé réseau ad-hoc qui présente l'avantage de répartir la charge de travail sur tous les nœuds du réseau. Le réseau est alors plus robuste aux pertes (i.e. disparition d'un nœud) et la charge peut être répartie sur plusieurs nœuds. La contrepartie réside dans la complexité des algorithmes distribués qui est très souvent supérieure à celle des versions centralisées étant donné qu'obtenir une vision complète et récente du voisinage dans un réseau où les nœuds sont mobiles est une tâche non-triviale. En effet, dans les réseaux décentralisés, il est souvent indispensable que chaque nœud puisse obtenir une vision fiable de son entourage. Cette information est destinée à être utilisée par des algorithmes tels que le routage, la dissémination d'information ou encore les algorithmes d'élection de leader. Cette vision est généralement déterminée par l'évaluation de la qualité des liens entre les nœuds. Cette évaluation doit pouvoir donner une estimation fiable malgré la présence de liens volatils du fait de la mobilité des nœuds et des perturbations de l'environnement. Dans le milieu sous-marins d'autres challenges sont à prendre en compte puisque que les communications acoustiques ont une faible bande passante, une latence importante et sont soumises

à des perturbations différentes. Les méthodes de découverte du voisinage doivent donc adopter une stratégie différente que celles utilisées dans les réseaux radio terrestres.

(ii) La mission de référence décrite en section 2.2 souligne le caractère hétéroclite des milieux de déploiement des systèmes (milieu aérien, terrestre et maritime). Nous avons également mis en évidence le caractère "orienté mission" des systèmes, autrement dit le fait que la conception des véhicules est spécifique à la mission réalisée. Par conséquent, les systèmes peuvent être classés en fonction de leur milieu de déploiement ainsi que de la mission réalisée. Cette classification nous amène donc à concevoir un plan d'adressage spécifique en utilisant à la fois des adresses de type Unicast et Anycast. Notre approche consiste à exploiter ces différents types d'adresses afin de diffuser une information, soit à un véhicule spécifique soit à un véhicule parmi un ensemble de véhicules identiques évoluant dans le même environnement et exécutant la même mission.

(iii) L'acheminement de bout en bout d'une information est une caractéristique essentielle pour garantir la coopération des différents véhicules. Néanmoins, il est impossible d'émettre des hypothèses sur la connectivité du réseau : une partie du réseau peut être fortement connectée, lorsqu'une seconde partie l'est faiblement voire pas du tout. Ce constat est alimenté par l'hétérogénéité de la mobilité des engins couplée à des environnements de propagation multiples et hétérogènes. Par conséquent, le processus de routage doit supporter un délai d'acheminement en fonctionnant. Ainsi le protocole proposé se basera sur des informations locales fiables et devra construire une vision du réseau en fonction des classes de véhicules présentes dans le réseau.

Pour conclure, notre approche permet donc de rendre interopérable les systèmes autonomes en proposant un protocole et une architecture de routage qui vise à cacher les spécificités des couches basses. Cette approche a pour objectif d'être compatible avec l'utilisation d'applications de plus haut niveau. L'approche proposée est compatible avec la JAUS [RW08], qui est une architecture applicative pour rendre interopérable les systèmes autonomes en proposant une architecture ainsi qu'un ensemble de messages qui permettent aux systèmes autonomes et à l'opérateur de pouvoir interagir.

2.5 Conclusion

Dans ce second chapitre, nous avons introduit la mission de référence de cette thèse et mis en évidence des problématiques réseau en rapport avec les systèmes autonomes. Ces problématiques portent sur les architectures de communication reposant parfois sur un élément central, parfois sur l'ensemble des éléments du réseau. Néanmoins, l'utilisation d'une architecture décentralisée apparaît comme l'approche la plus judicieuse et adaptée au contexte de cette thèse. Ce chapitre nous a aussi permis de souligner l'hétérogénéité des canaux de communication, canal radio (électromagnétique) pour les transmissions utilisant l'air comme support et le canal acoustique pour les communications sous-marines. L'étude des modèles de mobilité a mis en évidence leurs pluralités pour les réseaux aériens et terrestres, contrairement aux réseaux sous-marins. Il en résulte qu'il est difficile de faire une hypothèse sur la mobilité des engins. Cette caractéristique force notre approche à devoir s'adapter à un réseau où la connectivité des nœuds évolue fortement. Aussi, l'acheminement des données devra se faire à travers un protocole de routage tolérant aux délais, puisque de potentielles latences peuvent apparaître. Il convient donc d'étudier les réseaux ad-hoc déployés dans les domaines terrestres et maritimes dans le but d'observer les techniques spécifiques à chaque milieu, ce qui constitue l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 3

Les réseaux ad-hoc associés aux systèmes autonomes

« The nice thing about standards is that you have so many to choose from. »

Andrew S. Tanenbaum

Sommaire

3.1 Introduction	35
3.2 Taxonomie des réseaux ad-hoc	36
3.2.1 Réseaux terrestres et aériens	36
3.2.2 Réseaux marins et sous-marins	37
3.2.3 Comparaison des classes de réseaux	37
3.3 Étude des médias physiques de communication	38
3.3.1 Propagation des ondes électromagnétiques	38
3.3.2 Propagation acoustique sous-marine	43
3.3.3 Bilan	46
3.4 Couche liaison de données	46
3.4.1 Technique d'accès au canal	46
3.4.2 Protocoles de retransmission des trames	54
3.5 Conclusion	56

3.1 Introduction

Nous décrivons dans ce chapitre les différences entre les réseaux ad-hoc terrestres, aériens, marins et sous-marins. Une comparaison détaillée de ces réseaux sera ensuite établie, afin d'observer les médias physiques de transmission utilisés. L'utilisation de média de transmission hétérogènes est un challenge majeur pour permettre l'interopérabilité des engins. Elle se traduit par l'utilisation d'interfaces réseau distinctes qui utilisent des médias de transmission propres, chacun ayant des propriétés de propagation spécifiques. L'ensemble de ces différences impacte dès lors les mécanismes implémentés au niveau de la couche physique mais également ceux au niveau de la couche liaison de données.

Ce chapitre est organisé en trois parties. Dans la première partie de ce chapitre une description des réseaux ad-hoc et de ses sous-ensembles associés aux réseaux terrestres, aériens, marins et sous-marins est donnée. Nous nous focalisons ensuite sur l'étude de la couche physique où

nous présentons les principaux phénomènes physiques qui régissent le comportement du canal radio dans l'air et du canal acoustique sous-marin dans l'eau salée. Dans la dernière partie, les mécanismes d'accès au canal ainsi que les techniques de retransmission de trames utilisées par les protocoles de liaison de données dans les réseaux terrestres et sous-marins sont présentés.

3.2 Taxonomie des réseaux ad-hoc

Un réseau ad-hoc est composé de stations qui s'auto-organisent afin de former un réseau à la volée. Lorsque ces stations sont mobiles on parle alors d'un réseau MANET [CM99]. Il est défini comme une plateforme composée de nœuds mobiles qui se déplacent arbitrairement et forment une topologie dynamique. Un MANET peut être autonome ou bien être interconnecté à d'autres réseaux. Un MANET possède trois caractéristiques principales :

1. une topologie dynamique produite par un mouvement aléatoire ou déterminé des nœuds ;
2. une capacité de lien qui évolue en fonction des perturbations de l'environnement et de la mobilité des nœuds ;
3. une potentiel contrainte de consommation d'énergie liées à la présence de batteries embarquées.

Cette RFC indique une quatrième propriété relative à la sécurité, toutefois celle-ci ne rentre pas dans le cadre de la thèse. Il existe également plusieurs sous-catégories de ces réseaux associés aux systèmes autonomes que nous présentons dans les paragraphes suivants.

3.2.1 Réseaux terrestres et aériens

Lorsque des véhicules évoluent sur le réseau routier, on parle de VANET [Ali12]. La vitesse des nœuds est plus importante que dans les MANETs et varie selon l'environnement, 50 km/h en zone urbaine et 130 km/h sur autoroute (lois françaises en vigueur). La vitesse des véhicules peut entraîner des vitesses relatives importantes entre deux véhicules lorsqu'ils se croisent, réduisant considérablement la durée de vie du lien. Les nœuds peuvent également changer d'environnement, par exemple d'un milieu urbain à un milieu en espace libre, et qui possèdent des propriétés de propagation différentes. Le milieu urbain tend à perturber plus le signal que le milieu espace libre. Enfin, la densité des nœuds dans ces réseaux n'est pas uniforme et peut évoluer par exemple au cours de la journée (heures de pointe et heures creuses). On constate que lorsque cette densité est élevée et qu'il y a un important trafic réseau, le taux de perte de paquets est important. Enfin, les VANETs ne possèdent pas de contraintes énergétiques puisque les batteries des nœuds sont constamment rechargées par l'alternateur du véhicule.

Bekmerci et al. [BST13] introduisent le terme de FANET qui désigne les réseaux ad-hoc composés d'UAV. Les FANETs se distinguent des MANETs et des VANETs par la vitesse élevée des nœuds et qui peut atteindre environ 851 km/h pour le Northrop Grumman X-47B [DOD07]. Nous avons observé dans le chapitre 2 que la mobilité des UAVs était décrite par des modèles distincts. L'aspect énergétique doit également être pris en compte et particulièrement pour les engins de faible taille dont l'autonomie est réduite. Bouachar [Bou14] propose une autre désignation, UAANET, défini comme qui la composante "drone" des Aeronautical Ad hoc NETwork (AANET). L'auteur met en avant la forte similitude qui existe entre les réseaux véhiculaires et les réseaux aériens de par les trajectoires des engins qui les composent. L'auteur observe toutefois que les engins aériens et terrestres possèdent des vitesses différentes. Il constate également que les engins aériens peuvent évoluer à différentes altitudes ce qui impacte la mobilité.

Les réseaux de capteurs (Wireless Sensor Network (WSN)) sont une sous-catégorie de réseaux ad-hoc composés uniquement de capteurs déployés sur zone définie [ASSC02]. Ils sont caractérisés par une densité de nœuds élevée qui est justifiée par le modeste coût des capteurs et leur faible fiabilité. La consommation énergétique est un aspect crucial car les capteurs sont équipés de batteries à faible capacité ce qui impacte leur durée de vie. Enfin, parce que les capteurs peuvent être liés à une entité mobile, ces réseaux sont en mesure d'être statiques ou mobiles.

3.2.2 Réseaux marins et sous-marins

Le terme Nautical Adhoc NETwork (NANET) désigne les réseaux ad-hoc et maillés constitués de vaisseaux nautiques de surface mobiles. Contrairement aux réseaux terrestres et aériens les communications opèrent sur de plus grandes distances (30 km pour les liaisons à très hautes fréquences et jusqu'à 40 000 km pour les liaisons moyennes et hautes fréquences) mais avec des débits réduits (14.4 kbps pour des communications à très hautes fréquences et 9.6 kbps pour les liaisons moyennes et hautes fréquences). L'intérêt des fréquences d'ondes utilisées est la longue portée des communications qui permet de couvrir un vaste territoire. Kim et al. [KKW⁺09] décrivent deux scénarios de déploiement de NANETs. Dans le premier, plusieurs navires naviguent sur une zone côtière et forment un réseau maillé connecté à une station terrestre appelée Radio Access Station (RAS), dans le but d'étendre la couverture d'un réseau terrestre existant comme le WiMAX. Dans le second scénario, les navires évoluent hors de la zone côtière et s'auto-organisent pour former un réseau ad-hoc afin de communiquer entre eux par une technique de multi-sauts.

Le terme Underwater Sensor Networks (UWSN) désigne les réseaux de capteurs sous-marins. Ils sont actuellement les plus déployés et couvrent de nombreuses applications comme la surveillance du niveau de pollution ou encore l'étude de l'écosystème aquatique. Selon le type d'application visée, les réseaux de capteurs utilisent les ondes radios, optique ou acoustique. Les ondes acoustiques sont toutefois privilégiées car elles offrent de meilleures performances de communication. On parle alors de UnderWater Accoustic Sensor Network (UW-ASN). Les architectures formées par les UW-ASNs peuvent être classées en trois catégories. La première dite statique en deux dimensions, regroupe les capteurs sous-marins acoustiques fixes et ancrés sur le fond océanique. Cette architecture est déployée dans le cadre de missions de surveillance en milieu océanique et plus particulièrement pour l'étude des plaques tectoniques. La seconde inclut les architectures constituées de capteurs flottant à différentes profondeurs et reliés à un système d'ancrage pour fixer leurs positions. Elle est utilisée dans le cadre de missions de surveillance et d'analyse du milieu océanique (pollution, les courants marins, etc.). Enfin, la dernière catégorie regroupe les réseaux à la fois formés d'entités mobiles et statiques.

Le terme Underwater Ad-hoc Network (UANET) désigne les réseaux de véhicules autonomes mobiles opérant dans le milieu aquatique. Contrairement aux UWSNs, les engins suivent un chemin prédéfini ou se déplacent selon un modèle de mobilité [KCWG05]. Les UANETs regroupent à la fois les véhicules téléopérés (ROUV) et autonomes (AUV). Leur utilisation permet de réaliser des missions sans le besoin de déployer un nombre important d'engins comme dans les réseaux de capteurs. Par ailleurs, ils peuvent collaborer avec un réseau de capteurs existant dans le but de couvrir une zone plus étendue et donc d'assurer une collecte d'information plus importante.

3.2.3 Comparaison des classes de réseaux

Le tableau 3.1 synthétise les différences entre les catégories de MANETs. Les VANETs et les FANETs ont une topologie très volatile en raison de la vitesse potentiellement élevée des nœuds, (jusqu'à 851 km/h pour les engins aériens). Au contraire, les véhicules marins, en particulier sous-marins, se déplacent à des vitesses plus lentes, autour de 18-27 km/h [KCWG05] [GNM12]. La densité des nœuds dans un réseau varie en fonction de l'application et du milieu de déploiement. Les réseaux de capteurs terrestres possèdent une densité de nœuds beaucoup plus élevée que dans les réseaux sous-marins. Selon l'application désirée, les engins peuvent évoluer en groupe selon une formation en essaim ou en flotte. Lorsqu'ils évoluent en essaim, les engins couvrent une faible portion de zone avec une densité élevée. Tandis que le déploiement d'une flotte est caractérisée par une faible densité d'engins qui évoluent sur une zone étendue. Le dernier point concerne le support des transmissions. Les systèmes terrestres, aériens et marins de surface communiquent par liaisons radios. En revanche, les liaisons acoustiques sont privilégiées pour les communications sous-marines. Afin de mieux comprendre ces différents médias de transmission et leurs propriétés, une étude des propriétés physiques qui régissent le comportement d'un canal radio et acoustique est menée dans la suite de ce chapitre.

TABLEAU 3.1 – Caractéristiques des sous-catégories de MANETs

Catégorie	Média	Schéma de mobilité	Vitesse (km/h)	Densité du réseau
Terrestre & Aérien				
<i>VANET</i>	radio	urbaine, intérieur de bâtiment, espace libre	[30, 200]	variable
<i>FANET & UAANET</i>	radio	urbaine, intérieur de bâtiment, en espace libre	[0, 460]	variable
<i>WSN</i>	radio	N/A	statique	forte densité
Marin & Sous-marin				
<i>NANET</i>	radio	espace libre	[10, 30]	moyenne voir faible
<i>UWSN</i>	multiple (radio, acoustique, optique)	N/A	N/A	N/A
<i>UW-ASN</i>	acoustique	N/A / chemin pré-programmé	statique/mobile [10, 27]	variable

3.3 Étude des médias physiques de communication

Nous étudions dans cette section la couche physique en nous intéressant aux phénomènes physiques qui régissent le comportement des canaux radios dans l'air et des canaux acoustiques sous-marins. Toute communication implique un émetteur, un récepteur, un message contenant des données et un canal de transmission. Le canal de transmission comprend l'ensemble des éléments utilisés pour transmettre les messages, incluant les antennes émettrices et réceptrices et le canal de propagation, comme illustré figure 3.1. Le canal de propagation quant à lui correspond à l'environnement traversé par les ondes lors d'une transmission entre un émetteur et un récepteur.

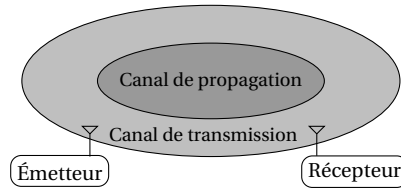


FIGURE 3.1 – Canal de propagation et canal de transmission

3.3.1 Propagation des ondes électromagnétiques

La propagation d'une onde électromagnétique est régie par les équations de Maxwell, dont les travaux s'appuient sur ceux de Faraday, Ampère et Gauss. Soit $\vec{r}$ un point d'observation à un temps t , le champ électrique $\vec{E}(\vec{r}, t)$ et le champ magnétique $\vec{H}(\vec{r}, t)$, satisfont les quatre équations :

$$\text{div} \vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{\rho(\vec{r}, t)}{\epsilon_0}, \quad (3.1)$$

$$\text{div} \vec{B}(\vec{r}, t) = 0, \quad (3.2)$$

$$\text{rot} \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}, \quad (3.3)$$

$$\text{rot} \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t}. \quad (3.4)$$

Avec c la célérité des ondes électromagnétiques, μ_0 la perméabilité du vide et ϵ_0 la permittivité du vide¹. Une onde électromagnétique comporte donc à la fois un champ électrique (E) et un champ magnétique (B) oscillant à la même fréquence et se propageant selon une direction orthogonale (figure 3.2).

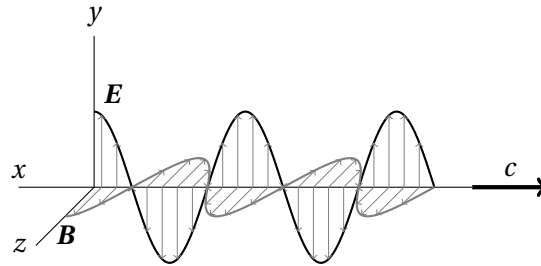


FIGURE 3.2 – Nature et propagation d'une onde électromagnétique

Les différentes fréquences du signal constituent ce que l'on appelle le spectre électromagnétique (figure 3.3).

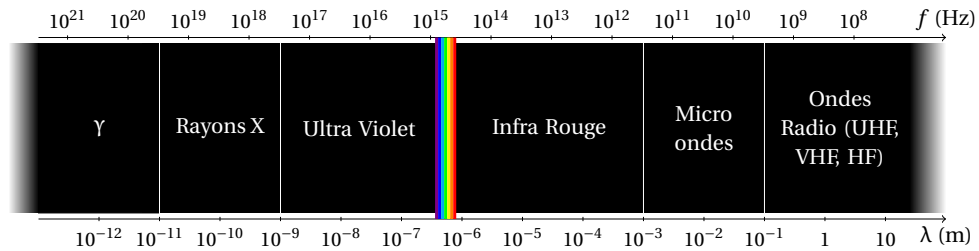


FIGURE 3.3 – Domaines du spectre électromagnétique

Dans le cas idéal, les ondes ne sont affectées que par la fréquence d'utilisation et la distance entre l'émetteur et le récepteur. Ce cas idéal est appelé propagation en espace libre, signifiant l'absence d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur. Soit G_t le gain de l'antenne d'émission et P_t la puissance du signal émis, la densité de puissance W présente à une distance d est donnée par [Par00] :

$$W = \frac{G_t P_t}{4\pi d^2}. \quad (3.5)$$

On peut relier la puissance W à la puissance P_r du signal disponible aux bornes de l'antenne réceptrice de gain G_r par l'équation :

$$P_r = W A_r = W \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi}. \quad (3.6)$$

Avec A_r l'aire effective de l'antenne² de réception et λ la longueur d'onde de la fréquence de travail. Si l'on combine les équations 3.5 et 3.6, on peut exprimer la formule de Friis [Fri46] qui permet de calculer l'atténuation d'un signal en espace libre :

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2. \quad (3.7)$$

Avec d la distance entre l'émetteur et le récepteur, f la fréquence de travail et c la célérité.

La propagation en espace libre est un cas de référence théorique où l'atténuation du signal est calculée de manière déterministe et dépend de la distance entre les stations, la fréquence utilisée, des puissances et des gains des antennes. Cependant dans des conditions réelles de propagation,

1. Les valeurs numériques sont données à titre indicatif, $c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ et $\epsilon_0 \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$.

2. L'aire effective est la capacité du récepteur à détecter le signal reçu.

les ondes électromagnétiques rencontrent des obstacles avec lesquelles elles vont interagir. Une onde électromagnétique et un milieu interagissent par l'intermédiaire de trois paramètres : (i) la perméabilité magnétique qui représente la faculté d'un matériau à modifier le champ magnétique; (ii) la conductivité qui représente l'aptitude d'un matériau à laisser les charges électriques se déplacer librement et (iii) la permittivité électrique qui correspond à la réponse du milieu à l'application d'un champ électrique. Ces interactions peuvent contribuer à atténuer, retarder, étaler le signal ou à introduire un multi-trajet dégradant sa qualité [Gui08].

Propagation multi-trajets

Dans la majorité des environnements réels, la transmission du signal se fait en empruntant plusieurs chemins [Gui08] [Led12]. Ces trajets sont le fruit de l'interaction du signal avec les obstacles présents dans l'environnement même s'il existe un trajet direct entre l'émetteur et le récepteur. Le signal reçu est donc la somme des échos reçus par le récepteur. Chacun possède une atténuation, un déphasage et un retard liés à la longueur des différents trajets. Ces interférences engendrent au niveau du récepteur des interférences constructives ou destructives qui contribuent à dégrader fortement la qualité du signal. On distingue deux types de configurations : la première où les nœuds sont en visibilité directs appelée, Line Of Sight (LOS) et la seconde où les trajets sont en non-visibilité directs, Non Line Of Sight (NLOS). Ces configurations dépendent à la fois de l'environnement et du positionnement des nœuds. Nous décrivons ci-dessous quatre des principaux phénomènes de propagation multi-trajets qui sont illustrés dans la figure 3.4.

Réflexion. Ce phénomène se produit lorsqu'une onde rencontre un obstacle de grande dimension par rapport à sa longueur (d'onde). On distingue deux types de réflexion : la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse. Si la surface réfléchissante est lisse, c'est-à-dire que la taille des irrégularités à la surface est petite devant la longueur d'onde, on parlera de réflexion spéculaire. À l'inverse si la surface réfléchissante est irrégulière ou rugueuse, on parlera de réflexion diffuse. L'énergie est alors réfléchiée dans un grand nombre de directions. Dans certains cas, l'environnement se comporte comme un guide d'onde et permet d'accroître la portée du signal.

Réfraction ou Transmission. Ce phénomène se produit lorsque qu'un matériau est traversé par une onde électromagnétique dont la trajectoire s'en trouve déviée. Ce phénomène joue un rôle assez faible lors de la propagation en environnement extérieur mais peut être prépondérante en milieu intérieur.

Diffraction. La diffraction se produit lorsqu'une onde atteint une arête ou une surface courbe d'un objet où elle se divise alors en une multitude d'ondes.

Diffusion. Ce phénomène se produit lorsqu'une onde rencontre un ensemble d'obstacles de dimensions inférieures à sa longueur d'onde provoquant une superposition des diffractions élémentaires. L'onde est alors réfléchiée dans toutes les directions.

Variations du canal de propagation

La propagation d'une onde est modifiée à chaque obstacle rencontré et évolue en fonction du type d'interaction matière/onde. Pour modéliser ce phénomène, des modèles mathématiques ont été développés qui prennent en compte trois échelles de variations du signal [Gui08] [Led12] :

- **le pathloss** ou variation à grande échelle, représente l'affaiblissement lié à la distance entre l'émetteur et le récepteur;
- **le shadowing** aussi appelé effet de masque, représente les variations lentes dues aux interactions avec les obstacles de l'environnement;
- **le fading** représente les fluctuations rapides du signal (variations à petite échelle), liées aux interférences constructives et destructives entre les différents trajets.

Ces échelles de variation traduisent des phénomènes inhérents au canal de propagation. Dans un contexte de mobilité, il est intéressant de s'intéresser aux propriétés spatio-temporelles du canal.

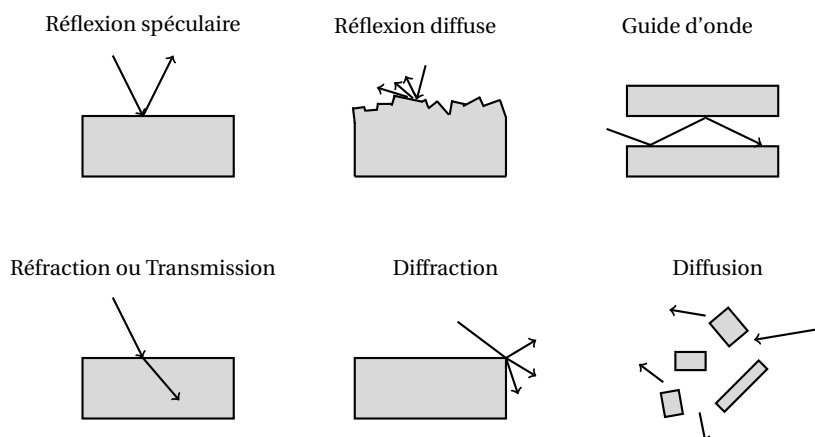


FIGURE 3.4 – Principaux mécanismes de propagation d'une onde

La variabilité temporelle est due aux mouvements des éléments dynamiques de l'environnement pouvant entraîner l'apparition et/ou la disparition de trajets. Ceci peut se produire lorsque des éléments à l'intérieur du canal sont en mouvement, comme des personnes ou encore des véhicules. La variabilité spatiale, quant à elle, est dûe aux déplacements des terminaux émetteurs et récepteurs ainsi des éléments de l'environnement. Ces variations sont proportionnelles à la vitesse et au sens de déplacement des éléments, les émetteurs et récepteurs y compris. Ce phénomène est appelé effet "Doppler" et se caractérise par un décalage entre la fréquence du signal émis et la fréquence du signal reçu.

Modèles de canaux de propagation

La propagation des ondes radio est régie par de multiples phénomènes qui entraînent des variations du canal qui impactent la qualité du signal reçu. Il est donc important de modéliser ces phénomènes. On distingue plusieurs modèles de propagation allant des modèles basés sur des hypothèses simplistes à des modèles plus sophistiqués et présentés ci-dessous [Led12] [Des11].

Modèles empiriques. Les modèles empiriques sont basés sur une analyse statistique d'un nombre important de données expérimentales. Ils ont l'avantage d'être des modèles simples et donc de nécessiter peu de temps de calcul, mais donnent des résultats peu réalistes en ne prédisant que les variations à grande échelle (pathloss). Ils sont donc utilisés pour modéliser les pertes déterministes. On retrouve parmi ces modèles le modèle de propagation en espace libre Friis [Fri46]. Le modèle two-ray ground qui prend en compte la réflexion de l'onde sur le sol. L'utilisation seule de ces modèles reste acceptable dans les milieux libres où très peu d'obstacles sont présents.

Modèles déterministes. Les modèles déterministes découlent des équations de Maxwell et permettent une description précise de l'environnement et de l'onde émise. On distingue les modèles à formulation rigoureuse ou exacts et les modèles asymptotiques en fréquence. Les modèles exacts ont l'avantage de fournir des résultats très précis, mais reposent sur une discrétisation géométrique de l'espace qui n'est pas appropriée pour une utilisation à grande échelle. Les modèles asymptotiques en fréquence ont été développés pour pallier les limites du passage à l'échelle des méthodes exactes. On distingue parmi ces modèles une approche physique fondée sur l'optique physique et la physique de diffraction pour calculer tous les champs magnétiques dans l'espace et une approche géométrique qui décrit les champs directs, réfléchis, transmis et diffractés, ce qui permet d'assimiler la propagation des ondes électromagnétiques à des tracés de rayons.

Modèles statistiques. Les modèles statistiques prédisent un comportement global du canal de propagation de manière stochastique. Ils reposent sur l'association d'une loi statistique à un en-

semble d'environnements ou de configurations qui partagent les mêmes propriétés. Ces modèles présentent l'avantage d'être plus rapides en temps de calcul, mais souffrent d'une précision inférieure aux modèles déterministes. Les modèles les plus utilisés en télécommunications sont Log-normal pour représenter l'effet shadowing et les modèles Rayleigh, Rice et Nakagami pour décrire le fading.

Modèle Rayleigh. Le modèle de Rayleigh [Pä03] modélise grâce à la distribution de Rayleigh les variations rapides de l'amplitude du signal reçu. Ce modèle est principalement utilisé lorsqu'un environnement est riche en chemins multi-trajets, mais qu'aucun ne prédomine en termes de puissance. L'amplitude du signal reçu z peut être décrite par la densité de probabilité de Rayleigh définie par l'équation 3.8.

$$P_z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.8)$$

avec $2\sigma^2$ la puissance moyenne efficace du signal reçu et où la phase de chaque trajet est supposée uniformément répartie sur l'intervalle $[-\pi, \pi]$.

Modèle Rice. Le modèle de Rice [Pä03] est utilisé pour modéliser la propagation dans un environnement avec un trajet dominant en termes de puissance. Dans ce modèle, l'amplitude du signal reçu z est décrite par la densité de probabilité de Rice donnée par l'équation 3.9.

$$P_z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{zA}{2\sigma^2}\right) \quad (3.9)$$

avec I_0 la fonction de Bessel (1^{ère} espèce d'ordre 0) et A l'amplitude du trajet prédominant. Le rapport entre la puissance du trajet prédominant et les multi-trajets est déterminé par le facteur $K = \frac{A^2}{2\sigma^2}$ qui représente le degré d'évanouissement. Lorsque l'amplitude du trajet prédominant est nulle ($K = 0$) on retrouve la distribution de Rayleigh et lorsque que $K \rightarrow \infty$, on retrouve une distribution Gaussienne.

Modèle Log-normal. Le modèle Log-normal [Pä03] permet de modéliser l'effet de masque. Sa densité de probabilité s'exprime par :

$$P_z(z) = \frac{1}{z\sigma_n\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2\sigma_n^2}\right), \quad (3.10)$$

avec μ la moyenne de la loi log-normale en dB qui correspond à l'atténuation moyenne du signal reçu, et σ_n^2 sa variance fixée de façon empirique selon le type d'environnement à modéliser [Pä03].

Modèle Nakagami. Le modèle de Nakagami [Pä03] peut être paramétré suivant les conditions de propagation. Les variations de l'amplitude du signal reçu z suivant la distribution de Nakagami sont données par l'équation 3.11.

$$P_z(z) = \frac{2m^m z^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mz^2}{\Omega}\right), \quad m > 0,5 \quad (3.11)$$

avec $\Omega = E[z^2]$ la puissance moyenne du signal reçu, la fonction Gamma Γ et m le degré d'évanouissement. Selon la valeur de m , il est possible d'approcher d'autres lois statistiques. Pour $m = 1$, la distribution de Nakagami correspond à une distribution de Rayleigh, pour $m = 0,5$ elle approxime la partie positive de la loi log-normale. Enfin pour $m = \frac{(K+1)^2}{2K+1}$ elle approche le modèle de Rice.

Modèle de Jakes. Le modèle de Jakes permet de décrire le décalage fréquentiel induit par un effet Doppler. La densité spectrale de puissance de Jakes normalisée $s(f)$ est donnée par :

$$S(f) = \frac{1}{\pi f_d \sqrt{1 - (f/f_d)^2}}, \quad |f| \leq f_d \quad (3.12)$$

Avec f_d la fréquence de translation maximale et f la fréquence de travail.

3.3.2 Propagation acoustique sous-marine

Les ondes acoustiques sont provoquées par la propagation d'une perturbation mécanique : une compression et dilatation locale qui se transmet d'un élément à un autre élément. La célérité d'une onde acoustique dépend de la masse volumique ρ et du module d'élasticité du milieu E^3 . Elle est donnée par la relation $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. Le milieu acoustique sous-marin n'est pas isocélère et la célérité c dépend de paramètres tels que la température, la pression hydrostatique et la salinité qui varient de manière spatiale/temporelle. Néanmoins, d'une manière générale le son se propage dans l'eau à une vitesse 1500 m.s^{-1} ⁴, soit un ordre cinq fois inférieur à la célérité d'une onde électromagnétique dans l'air qui est 3.10^8 m.s^{-1} . Une formule couramment utilisée dans la littérature pour calculer la célérité du signal acoustique dans l'eau est donnée par la formule empirique de Clay and Medwin [CM77], équation 3.13, avec c en m.s^{-1} , la température en degrés Celsius, S la salinité en ‰ et z en mètres :

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016z. \quad (3.13)$$

Il existe plusieurs domaines de fréquences qui sont exploités par différentes applications dites Acoustique Sous-Marine (ASM). Le choix d'une fréquence doit tenir compte de l'amortissement du son, la taille de la source sonore, la résolution spatiale ainsi que la réponse acoustique de la cible. Nous donnons ci-dessous quelques gammes de fréquences utilisées par des systèmes de communication acoustiques sous-marins [Lur98].

TABEAU 3.2 – Gammes des fréquences utilisées par les systèmes acoustiques sous-marins

Systèmes	Fréquences
Sonars passifs (écoute seule)	[0,10]kHz
Sondeurs de sédiments	[1,10]kHz
Transmission et positionnement	[10,70]kHz
Sonar actif	[20,200]kHz

Atténuation du signal

Le signal acoustique subit naturellement une atténuation qui dépend à la fois de la fréquence du signal f et de la distance d parcourue par le signal. En l'absence d'obstacles dans le milieu, cette atténuation est décrite par l'équation :

$$A(d, f) = A_0 d^k a(f)^d \quad (3.14)$$

avec A_0 la constante d'échelle, k le facteur d'étalement et $a(f)$ le coefficient d'absorption qui peut être obtenu à partir de résultats empiriques [BL03]. L'atténuation du signal dans le milieu marin dépend principalement des pertes induites par trois phénomènes de différentes natures. On distingue les pertes par divergence géométrique, les pertes par amortissement et les pertes dues aux interactions avec le fond et la surface.

Les pertes par divergence géométrique correspondent à la diminution de la densité surfacique de puissance au fur et à mesure que l'onde s'éloigne de la source. Elles s'expriment selon l'équation :

$$A_d = 10 \times m \log D. \quad (3.15)$$

La perte A_d est exprimée en décibels, D représente la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur et m la géométrie de la dispersion.

3. Rapport entre la contrainte et la déformation élastique provoqué par celle-ci.

4. À titre indicatif le son se propage dans l'air à une vitesse de l'ordre de 340 m.s^{-1} .

Le milieu de propagation étant dissipatif, seule une partie de l'énergie de l'onde est transmise. L'amortissement est souvent le plus important facteur limitatif de la propagation acoustique. Il est exprimé par un coefficient d'absorption $\alpha(f)$ qui est donné par la formule de Thorp :

$$\alpha(f) \simeq 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (3.16)$$

avec f la fréquence du signal en kHz.

Enfin, les pertes dues à la réflexion du signal à la surface ou sur le fond marin dépendent de très nombreux paramètres comme la rugosité, la présence de bulles d'air en ce qui concerne la surface et le relief et le type de sédiment pour le fond marin. Ce type de pertes est très difficile à prédire et à quantifier, ce qui le rend très difficile à modéliser.

Bruit du canal acoustique

Le bruit dans un canal acoustique sous-marin est composé d'un bruit ambiant et d'un bruit spécifique à des sites particuliers. Les principales sources de bruit ambiant sont les turbulences, le trafic maritime, les vagues, le bruit thermique [Sto07]. Ces sources peuvent être caractérisées par une distribution Gaussienne de densité spectrale de puissance donnée par :

- turbulences : $10 \log N_t(f) = 17 - 30 \log f$,
- trafic maritime : $40 + 20(s - 0.5) + 26 \log f - 60 \log(f + 0.03)$,
- vagues : $50 + 7.5 w^{1/2} + 20 \log f - 40 \log(f + 0.4)$,
- bruit thermique : $-15 + 20 \log f$.

Avec f la fréquence exprimée en kHz, s le facteur d'activité du trafic maritime compris entre $[0,1]$ et w la vitesse du vent en $m.s^{-1}$. Il existe d'autres sources de bruits ambiants comme les sifflements, claquements ou d'autres bruits produits par les espèces marines. Le bruit ambiant est décrit comme un bruit Gaussien mais non blanc dont la densité spectrale peut s'approximer selon l'équation 3.17 [PS13] :

$$N(f) \approx N_0 f - \eta \quad (3.17)$$

où N_0 est une constante mesurée pour une localisation précise, η est le facteur qui modélise l'affaiblissement de la densité spectrale de puissance (fixée usuellement à 18 dB/décade). Il existe également des bruits propres à un environnement, par exemple dans les régions arctiques où les craquements de la glace génèrent un bruit spécifique.

L'équation 3.14 montre que l'atténuation du signal croît avec la fréquence, mais aussi avec le bruit. Il en résulte donc que le rapport signal sur bruit, Signal to Noise Ratio (SNR), varie en fonction de la fréquence utilisée. Ce rapport peut se calculer de la manière suivante :

$$SNR(d, f) = \frac{S_l(f)}{A(d, f)N(f)} \quad (3.18)$$

avec $S_l(f)$ la densité spectrale de puissance du signal, $A(d, f)$ l'atténuation du signal et $N(f)$ le bruit.

Aspect du multi-trajets du signal acoustique

La présence de multi-trajets est provoquée non seulement par la réflexion des ondes acoustiques à la surface et sur le fond marin, mais aussi par les entités présentes dans l'environnement ainsi que par la réfraction du son dans l'eau. Bien que le nombre de trajets multiples varie de manière notable en fonction de l'environnement, on distingue généralement les milieux grands et petits fonds qui présentent des profils de réflexion notablement différents. Dans les milieux petits fonds, la réflexion du signal est largement occasionnée par le fond, la surface, et l'hétérogénéité de l'environnement tandis que les milieux grands fonds sont plus homogènes. La figure 3.5 illustre la formation de multi-chemins dans les milieux petits et grands fonds.

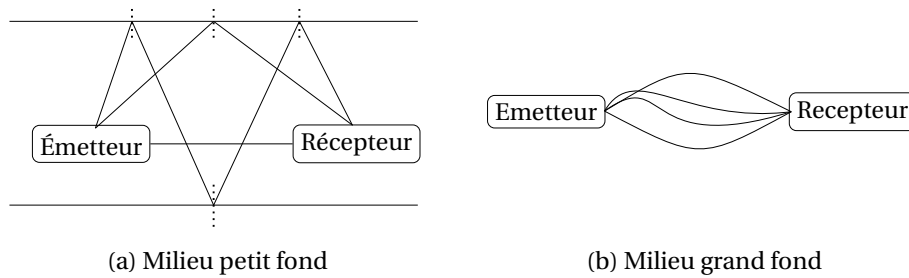


FIGURE 3.5 – Illustration de la présence de chemins multiples dans les milieux petits et grands fonds

Le retard des différents trajets dépend de la célérité de l'onde acoustique. L'équation 3.13 montre que cette célérité dépend à la fois de la température de l'eau, de la salinité et de la pression qui varie en fonction de la profondeur. La salinité variant peu, l'effet de la température et de la pression sont prépondérants. Près de la surface, la température et la pression sont quasiment constantes, la célérité du son varie donc peu. À mesure que la profondeur augmente, la température baisse ce qui a pour effet de diminuer la vitesse du son qui n'est pas compensée par l'augmentation de la pression. Cette diminution de la température est appelée thermocline principale. Au-delà d'une certaine profondeur, la température devient stable (4 °C) on parle alors d'isotherme. À partir de cette profondeur, la pression augmente et la célérité du signal croît de nouveau. La figure 3.6 représente le profil bathycélérimétrique qui est une représentation schématisée de la vitesse du son dans l'eau à différentes profondeurs.

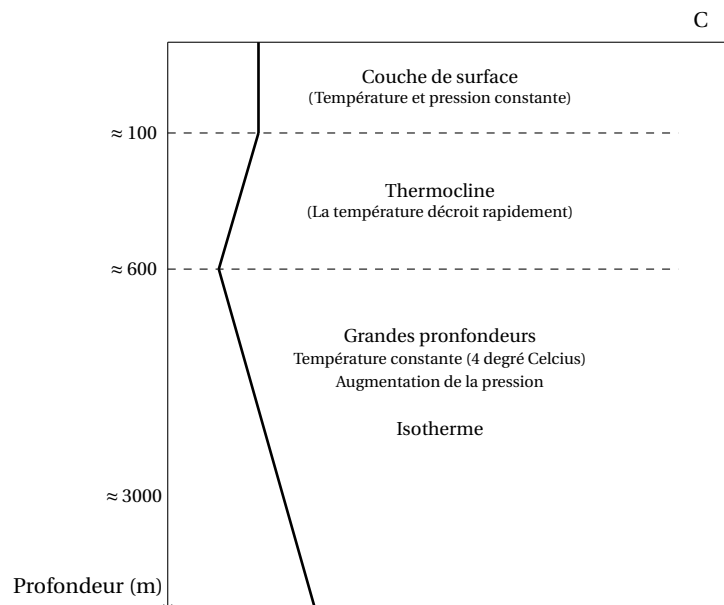


FIGURE 3.6 – Profil bathycélérimétrique

Effet Doppler

L'effet Doppler est une modification de la fréquence du signal pendant sa propagation, due à une variation de la durée du trajet émetteur-récepteur pendant la phase d'émission. Ce phénomène est provoqué par les mouvements de l'environnement ainsi que par la mobilité de la source du signal et du récepteur. L'effet Doppler résultant ϵ est défini comme le ratio entre la vitesse relative de l'émetteur et du récepteur v et la célérité du milieu c . Comme pour les communications électromagnétiques, l'effet Doppler consiste en une translation de la fréquence d'origine. Ce phénomène tend à fortement dégrader la qualité des transmissions, plus la vitesse des éléments de l'environnement augmente plus la qualité du signal se dégrade.

Milieux grand et petit fond

On distingue généralement dans la littérature deux types d'environnements de propagation à savoir le milieu grand et petit fond. D'un point de vue géologique, un milieu est dit petit fond si sa profondeur est inférieure à une centaine de mètres. D'un point de vue propagation un milieu est considéré comme petit fond lorsque les ondes acoustiques interagissent de façon importante avec le fond et la surface. Pour qualifier la profondeur des eaux, on peut se baser sur des caractéristiques géométriques comme le ratio entre la distance entre un émetteur et récepteur, (D) et la hauteur d'eau (H). Coates [Coo93] utilise le rapport D/H pour qualifier la profondeur des eaux.

Le profil bathycélérimétrique des milieux petits fonds est principalement déterminé par la température où des changements de température qui opèrent entre le fond et la surface. La présence des marées, la rugosité du fond rendent le milieu plus hétérogène. La faible profondeur engendre de nombreuses réflexions sur le fond et à la surface ce qui contribue à engendrer plus d'interférences et donc à dégrader fortement le signal. L'environnement petit fond est plus hétérogène que le milieu grand fond qui offre un canal de communication moins bruité. Néanmoins, la présence de courants dans les grands fonds marins contribue à générer des multi-chemins.

3.3.3 Bilan

L'étude de la propagation des signaux radio dans l'air et des signaux acoustiques dans l'eau nous ont permis de comprendre les différents phénomènes physiques associés. Nous avons remarqué que la propagation d'un signal est affectée à la fois par des pertes déterministes liées à la distance entre l'émetteur et le récepteur et des pertes stochastiques liées à l'environnement (bruit, fading). Nous avons également mentionné que la célérité des signaux radio et acoustiques dans deux environnements distincts est très différente, $1.10^8 m.s^{-1}$ pour l'un et $1500 m.s^{-1}$ pour l'autre. Parallèlement, les systèmes de communication acoustiques contrairement aux systèmes radio de type Wi-Fi (2.4GHz) utilisent une plage de fréquences plus petite $[10, 70] kHz$. Par conséquent la bande passante disponible est plus faible.

L'observation des différents phénomènes de propagations des ondes acoustique et radios dans l'eau et l'air nous ont permis de comprendre leurs différences. Ces propriétés physiques ont également un impact au niveau des communications réseaux en terme de délai, ou encore de qualité des transmissions. C'est pour cela que nous proposons d'étudier les mécanismes de la couche liaison de données notamment concernant le partage du canal de propagation mais également les mécanismes de détection d'erreurs.

3.4 Couche liaison de données

Le transfert de données entre deux nœuds sur le média physique est assuré par la couche liaison de données. Pour transmettre ses données, un nœud doit faire l'acquisition du média. Néanmoins, la méthode d'accès au canal pose des problèmes de contention entre les nœuds, lorsqu'ils veulent transmettre en même temps. Ce problème est d'autant plus difficile que les communications acoustiques souffrent d'une latence importante comme dans le cas des communications acoustiques sous-marines. Par ailleurs, les données transmises peuvent être altérées voir perdues. Dans cette partie nous décrivons les défis majeurs de la couche liaison de données, à savoir les techniques d'accès au canal, ainsi que les mécanismes de détection d'erreurs et de retransmission (ARQ).

3.4.1 Technique d'accès au canal

Lorsqu'un nœud veut transmettre des données, il doit tout d'abord faire l'acquisition du canal pour transférer ses données sur le média. Les stations doivent cependant éviter de transmettre leurs données simultanément sous peine de provoquer des collisions occasionnant la perte des

données envoyées. Dans la littérature, les techniques d'accès au canal sont généralement classées en deux catégories : avec ou sans contention.

Méthodes sans contention

Historiquement, les premières solutions reposaient sur des méthodes par consultation. L'une d'entre elle reposait sur un modèle maître-esclave : le nœud maître allouait la parole aux stations esclaves (tour de rôle ou bien selon un ordre pré-établi). Néanmoins, cette solution n'est viable que lorsque la taille du réseau est faible. Une autre méthode consiste à faire circuler un jeton qui permet de déterminer le droit de parole entre les stations. Malheureusement, la monopolisation du jeton par une station peut entraîner un dysfonctionnement amenant un nœud à un état de famine. Ce type de méthode repose aussi sur une topologie en anneau afin de faire circuler le jeton de manière optimale. De manière générale, ces méthodes ne peuvent être déployées que sur des réseaux de faible taille. D'autres méthodes basées sur des techniques de multiplexage permettent la gestion d'un média sur des réseaux de plus grande taille. Ces techniques sont décrites dans les paragraphes suivants et illustrées dans la figure 3.7 [Toh01].

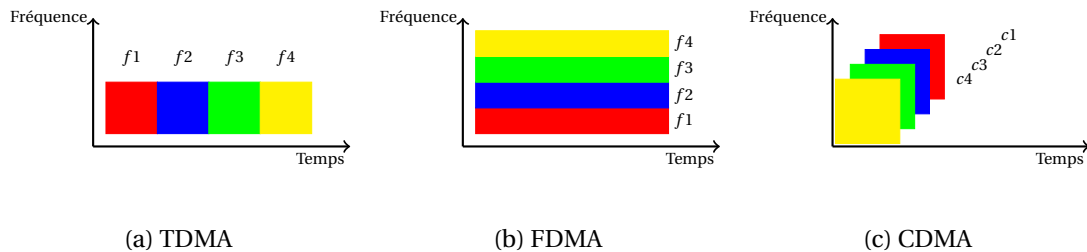


FIGURE 3.7 – Techniques de multiplexage

Le Time Division Multiple Access (TDMA), fig. 3.7a, est un mode d'accès par répartition du temps de parole. Chaque station obtient un temps de parole attribué par la station maître qui pour ce faire, assigne un nombre limité de slots de taille fixe à chaque station. Bien que cette solution permet d'éviter toute contention entre les nœuds, si un slot est laissé libre, il ne pourra pas être utilisé par une autre station. On note que le découpage du temps de parole en slot nécessite le maintien d'une horloge synchronisée afin de déterminer la durée et le début d'un slot.

Le multiplexage fréquentiel appelé Frequency Division Multiple Access (FDMA), fig. 3.7b, repose sur la subdivision du spectre fréquentiel pour allouer chaque bande à un utilisateur unique. Contrairement au TDMA aucune synchronisation de l'horloge n'est nécessaire. Le débit du canal étant dépendant de la fréquence utilisée, il y aura par conséquent une hétérogénéité des débits entre les stations en fonction de la fréquence porteuse attribuée. Un autre inconvénient concerne la sous-utilisation des fréquences lorsque celles-ci ne sont pas utilisées par le nœud. Il est toutefois possible d'optimiser l'utilisation des fréquences en utilisant une radio intelligente (radio cognitive).

Le multiplexage par code Code Division Multiple Access (CDMA), fig. 3.7c, repose sur l'utilisation d'un code unique attribué à chaque station pour encoder les données à transmettre. Le codage des données permet la transmission simultanée de plusieurs stations sur la même bande de fréquence : le récepteur retrouve les données en décodant le signal reçu. Pour cela, les codes utilisés doivent être orthogonaux, c'est-à-dire que leur produit scalaire est nul.

Il existe d'autres méthodes comme l'Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) qui combine le procédé de codage Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) et la méthode d'accès TDMA, ou encore le multiplexage spatial qui repose sur une allocation d'un niveau de priorité d'accès au canal en fonction de la position géographique des nœuds. L'espace géographique est alors segmenté en parcelles, chacune possédant un niveau de priorité d'accès au canal différent.

Pour conclure, nous abordons la question du contrôle des allocations ou comment allouer les fréquences (FDMA), les intervalles de temps (TDMA) ou encore les codes (CDMA). Deux solutions peuvent être envisagées. Dans la solution statique, Fixed Assignment Multiple Access (FAMA), chaque émetteur est pré-configuré. Ceci peut néanmoins conduire à sous-utiliser le réseau (présence de stations silencieuses) et à ne pas s'adapter aux demandes des utilisateurs. Dans la solution dynamique, Dynamic Assignment Multiple Access (DAMA), la station qui contrôle les allocations gère l'arrivée de nouveaux clients. Il est important de souligner que des canaux libres soient disponibles pour satisfaire la demande de nouveaux clients. Chaque nouvelle station effectuant une demande le fera en compétition avec les autres nouvelles stations. L'intérêt majeur de ces méthodes est de pouvoir garantir un accès au média de manière fiable sans risquer de provoquer une collision. Néanmoins, dans un contexte de mobilité de toutes les entités du réseau, il est très difficile de coordonner l'accès au média via une station centrale. Ces méthodes sont par conséquent inadaptées et délaissées au profit des méthodes par compétition.

Méthodes par compétition

Dans les méthodes avec contention les nœuds sont en compétition pour obtenir l'accès au canal. On distingue deux classes : (i) basée sur un accès aléatoire, (ii) basée sur une écoute du canal pour en déterminer l'état.

ALOHA Le protocole ALOHA [Abr70] fournit un service d'accès opportuniste au média sans le besoin d'une unité centrale, ni même d'une synchronisation préalable entre les nœuds. Lorsqu'un nœud veut transmettre des données, il les envoie directement quel que soit l'état du canal, libre ou occupé. Un acquittement (ACK) est alors renvoyé, pour accuser la bonne réception des données. Chaque nœud maintient une horloge pour déterminer le temps à attendre pour recevoir un ACK et retransmet automatiquement ses données tant que le ACK correspondant n'est pas reçu. Ce protocole présente l'avantage d'être simple, mais possède l'inconvénient d'envoyer les données en ignorant l'état du média (libre ou occupé) ce qui tend à provoquer de nombreuses collisions. Pour être efficace, cette méthode d'accès implique à la fois une faible densité de nœuds, un faible taux d'utilisation du canal. Une illustration du fonctionnement du protocole ALOHA est donnée figure 3.8.

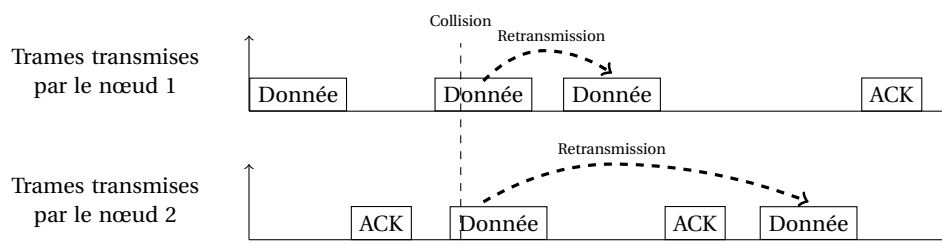


FIGURE 3.8 – Technique d'accès ALOHA

Une amélioration du protocole ALOHA appelée Slotted ALOHA (S-ALOHA) dans laquelle le temps est discrétisé en slot de temps est proposée par Roberts [Rob75]. Dans cette version, un nœud ne peut accéder au canal qu'au début d'un intervalle de temps (slot), ce qui tend à limiter la probabilité de collisions. En effet si aucune collision ne survient au début de l'intervalle de temps, alors le nœud est assuré d'avoir l'exclusivité du canal durant le slot de temps. Cependant, tous les nœuds doivent être synchrones ce qui nécessite une phase de synchronisation des horloges. Roberts avance que cette phase peut être effectuée en faisant une observation des paquets transitant sur le réseau. La figure montre un exemple d'accès au média avec S-ALOHA, fig 3.9.

L'introduction d'un temps discrétisé permet au protocole S-ALOHA d'offrir un meilleur débit par rapport à la version originale d'ALOHA comme le montre la courbe de performance de la figure 3.10. Cette augmentation du taux de réception des trames s'explique par la réduction de la probabilité de collision avec S-ALOHA. Si aucune collision ne survient au début d'un intervalle, le

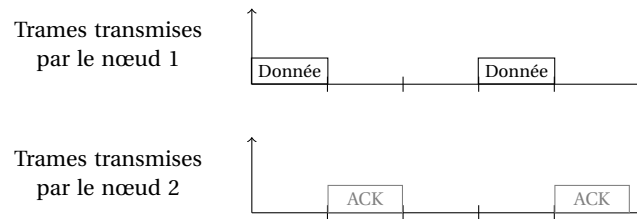


FIGURE 3.9 – Technique d'accès S-ALOHA

nœud est assuré qu'il ne sera plus en contention durant cet intervalle de temps. La courbe montre également que lorsque le trafic généré devient plus important, le taux de réception des trames diminue pour les deux protocoles.

Carrier Sense Multiple Access (CSMA) La technique du Carrier Sense Multiple Access (CSMA) se distingue des méthodes basées sur ALOHA par une phase d'écoute du canal pour en connaître son état et déterminer si la transmission de données est possible. La station procède d'abord à une écoute du canal afin de détecter si d'autres transmettent. Si le canal est occupé, elle continue sa phase d'écoute et reporte donc son émission; dans le cas contraire, elle transmet ses données. On distingue plusieurs versions du protocole CSMA qu'il est possible de classer en deux catégories, la version persistante et la version non persistante [KT75]. Dans la version persistante de CSMA une station écoute continuellement le canal jusqu'à ce qu'il devienne libre. La station transmet alors immédiatement son message. Cette méthode présente l'inconvénient majeur de provoquer des collisions lorsque plusieurs nœuds veulent transmettre leurs données simultanément. Avec le CSMA non-persistant, une station qui détermine que le canal est occupé diffère sa prochaine écoute selon un temps aléatoire. Cette technique permet de réduire la probabilité de collision, mais tend à augmenter le temps d'accès au média. Dans la variante CSMA P-persistant lorsqu'une station détecte que le média est libre, le message est transmis avec une probabilité p . Pour chaque trame à envoyer, la station sonde à nouveau le média et répète la même procédure jusqu'à ce qu'il n'ait plus de trames à envoyer. Si le média est occupé alors la station attend qu'il devienne libre pour transmettre ses informations. La figure 3.10 montre l'impact des méthodes ALOHA, S-ALOHA, CSMA non persistant et le CSMA 1-persistant (cas particulier avec $p = 1$) sur le débit du réseau en fonction de sa charge.

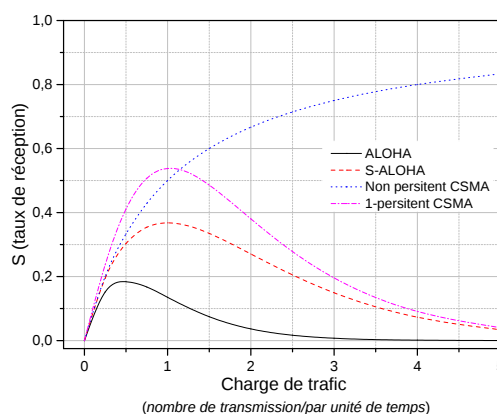


FIGURE 3.10 – Taux de réception fournie par ALOHA et CSMA en fonction de la charge de trafic du réseau

Le fait de procéder à une écoute du canal permet de réduire la probabilité de collision. Cependant, cela ne permet pas d'éviter l'accès simultané au média par plusieurs stations provoquant de manière inévitable une ou plusieurs collisions. Pour pallier cette faiblesse, des mécanismes supplémentaires ont été introduits, tels que la détection de collision (Collision Detection) ou l'évitement de collision (Collision Avoidance). La détection de collisions peut se faire si et seulement si un nœud possède une interface capable à la fois d'écouter et d'envoyer sur le média en même

temps. L'utilisation d'un média filaire permet aisément la détection mais l'utilisation d'un média sans fil est plus délicate. Tout d'abord, lorsqu'une interface sans fil émet des données, la fonctionnalité d'écoute est indisponible. Ensuite, l'utilisation d'une interface secondaire dédiée uniquement à l'écoute est une solution très coûteuse, puisque chaque station doit maintenir deux interfaces. La détection d'une collision étant impossible, il est donc indispensable d'ajouter un mécanisme d'évitement de collision. On retrouve ce mécanisme dans plusieurs standards dont notamment l'IEEE 802.11. Ce standard IEEE utilise la technique CSMA/CA pour créer une méthode d'accès décentralisée appelée Distributed Coordination Function (DCF). Son principe repose sur l'écoute du canal pour déterminer son état. Si celui-ci est occupé, l'algorithme de backoff entre en jeu afin de différer la transmission des données dans le but d'éviter l'accès simultané au média. Cependant, ce mécanisme d'évitement de collision ne protège pas le réseau de toutes les collisions. Deux scénarios qui illustrent très bien ce point, le problème de la machine cachée et le problème de la machine surexposée qui sont illustrés par la figure 3.11 (les cercles montrent la portée de communication des nœuds).

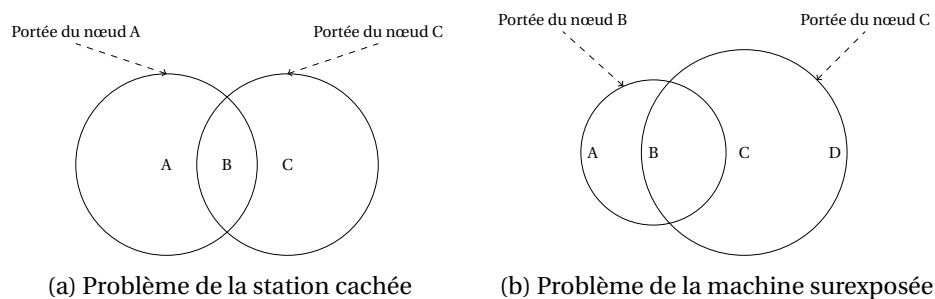


FIGURE 3.11 – Problématique de la machine cachée et surexposée

Dans le scénario de la machine cachée, fig 3.11a, le nœud B se trouve dans la portée des nœuds A et C. Mais A et C ne peuvent s'entendre directement. Si le nœud C envoie des données à B et que le nœud A écoute le canal, il le déterminera libre et enverra des données à B provoquant une collision. Dans le cas de la machine surexposée, fig 3.11b, lorsque le nœud C envoie des données, les nœuds D et B diffèrent leur envoi. Cependant, il n'est pas nécessaire que le nœud B attende que C finisse sa transmission pour qu'il puisse communiquer avec A. Afin de résoudre ces problèmes une approche consiste à utiliser des protocoles de réservation de lien via des paquets de contrôle. Pour cela, DCF utilise une technique de réservation du média via les messages Request to Send (RTS)/Clear to Send (CTS) hérités du protocole MACA.

Multiple Access Collision Avoidance (MACA) Le protocole MACA a été proposé par Karn [Kar90] pour pallier les faiblesses du CSMA dans le cadre du problème de la machine cachée et de la machine exposée. Le protocole se base sur un mécanisme de réservation de lien basé sur des messages de signalisation appelés RTS/ CTS. La figure 3.12 illustre un scénario où trois stations sont en conflit pour communiquer.

Lorsque le nœud A veut envoyer des données à B il lui envoie un message RTS contenant la longueur des données à envoyer. Puis le nœud B renvoie un message CTS contenant lui aussi la longueur du message à recevoir. Une fois le CTS reçu par A, la communication peut commencer. Tous les nœuds recevant un message CTS, diffèrent automatiquement leur transmission en fonction de la longueur du message déclarée dans le message CTS. Si un nœud entend un RTS, il diffère ses transmissions d'une durée assez longue pour qu'un CTS puisse aussi être entendu. Si le CTS n'a pas été capturé (dépassement du CTS timeout), le nœud se considère hors de portée du nœud destinataire et peut transmettre ses données (excepté au nœud émetteur du RTS). Lorsque la réservation du lien se termine les autres stations diffèrent aléatoirement leur écoute du canal pour éviter l'envoi d'un message RTS en simultané. Pour rendre le protocole plus performant Karn incorpore un mécanisme de gestion de puissance d'émission. Durant la phase de réservation, les nœuds peuvent déterminer le niveau de puissance de transmission minimal requis pour commu-

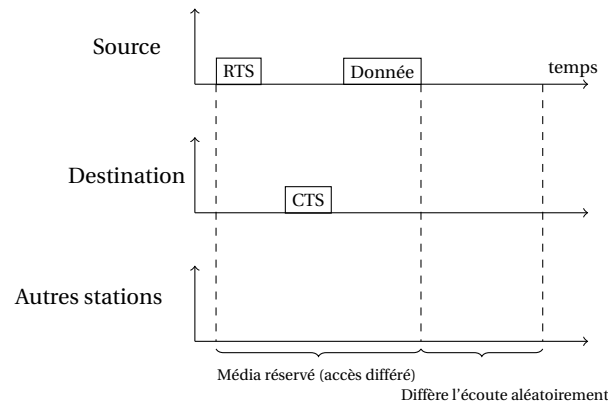


FIGURE 3.12 – Accès par contention au média avec MACA

niquer par une méthode empirique. Celle-ci permet d'ajuster la puissance de transmission et donc de réduire la probabilité d'apparition d'une configuration de type machine exposée.

MACA Wireless (MACAW) Le protocole MACA Wireless (MACAW) [BDSZ94] est une amélioration du protocole Multiple Access Collision Avoidance (MACA). Contrairement à MACA, le protocole MACAW dispose d'un mécanisme d'acquittement pour détecter la perte de trames. Ce mécanisme permet de recouvrir plus rapidement la perte des données, puisque ce processus est réalisé à chaque réception de la trame (contrairement à Transmission Control Protocol (TCP) qui est réalisé uniquement par le nœud destinataire. Le protocole possède également un mécanisme qui permet de confirmer le succès de la réservation de lien via l'utilisation d'un message de type Data Sending (DS) et permet de réaliser une réservation du canal en trois phases similaires à TCP. La confirmation de la réservation permet aux stations voisines de confirmer la réservation du média et donc de déferer leurs transmissions. Sans ce mécanisme chaque station déferait automatiquement sa transmission à chaque réception d'un message RTS, même si la réservation devait échouer.

MACA for Underwater (MACA-U) Ng et al. [NSM08] proposent une adaptation du protocole MACA pour les réseaux sous-marins acoustiques. Alors que le protocole MACA est conçu pour opérer dans les réseaux terrestres où les délais de propagation du signal sont faibles⁵, les délais de propagation dans les réseaux acoustiques⁶ sont beaucoup plus importants. Ng et al. proposent trois améliorations. La première porte sur les états du protocole. Dans le protocole MACA lorsqu'une station est en attente de données ou en attente d'un message CTS elle passe en état de silence si elle entend un paquet CTS (différent de celui attendu) ou un paquet RTS, ce qui peut arriver dans un réseau où le temps de propagation des messages est important. Pour remédier à ce problème, les auteurs modifient les transitions entre les états que nous détaillons dans le tableau 3.3.

La seconde amélioration consiste en l'utilisation de deux piles de type First In First Out (FIFO), l'une dédiée aux messages générés par le nœud, l'autre aux messages à relayer. Cette seconde file d'attente possède une priorité sur la première. La dernière amélioration concerne le backoff calculé à partir d'un Binary Exponential Backoff (BEB) ce qui offre une meilleure réactivité comparée à d'autres méthodes comme le Multiplicative Increase Linearly Decrease (MILD).

Propagation delay tolerant Collision Avoidance Protocol (PCAP). Le protocole PCAP fut proposé par Guo et al. [GFR06] et exploite la latence du signal acoustique sous-marin. Lorsqu'un nœud A envoie un message RTS à un nœud B, il force le report du message CTS du nœud B, afin de permettre à A d'effectuer d'autres actions comme l'envoi de données à une autre station. Soit

5. Célérité du signal radio dans l'air : $3.10^8 m.s^{-1}$.

6. célérité du signal acoustique dans l'eau : $1500 m.s^{-1}$.

TABLEAU 3.3 – Transition d’état dans Multiple Access Collision Avoidance for Underwater (MACA-U) [NSM08]

État	Réception d'un RTS	Réception d'un CTS	Sur-écoute d'un RTS	Sur-écoute d'un CTS	Expiration du timer
Libre	Envoi CTS Attente de données	paquet ignoré	<i>Timer :</i> SILENCE_RTS ¹ Silence ³	<i>Timer :</i> <i>Silence_CTS</i> ² SILENCE	-
Contention	Envoi CTS Attente de données	paquet ignoré	<i>Timer :</i> SILENCE_RTS SILENCE	<i>Timer :</i> SILENCE_CTS SILENCE	Transmet : RTS <i>timer</i> = SILENCE_RTS Libre
Attente d'un CTS	paquet ignoré	décrémente le BEB Transmet : DATA Libre	paquet ignoré	<i>Timer :</i> SILENCE_CTS SILENCE	Incréméte le BEB Backoff Libre
Attente de données	paquet ignoré	paquet ignoré	paquet ignoré	paquet ignoré	Libre
Silence	paquet ignoré	paquet ignoré	SILENCE	SILENCE	Libre

¹ QUIET_RTS = $2\tau_{max}$ + durée d'un CTS.

² QUIET_CTS = $2\tau_{max}$ + durée de la transmission des données.

³ QUIET = $\max\{\text{durée de silence local, durée de silence transmis (paquets CTS et RTS)}\}$.

T_d le temps maximal de propagation du signal acoustique entre le nœud A et B, t_t le temps absolu auquel le message RTS a été transmis et t_r le temps auquel le message a été reçu. Lorsque le nœud B reçoit un message RTS il reporte sa transmission, $T_{B,def}$ selon l'équation 3.19 :

$$T_{B,def} = 2(T_d - (t_r - t_t)). \quad (3.19)$$

Les messages RTS contiennent donc une donnée temporelle, t_r . Il est donc nécessaire de maintenir une horloge calibrée sur le même référentiel. La figure 3.13 illustre la négociation de réservation de lien entre deux nœuds avec PCAP.

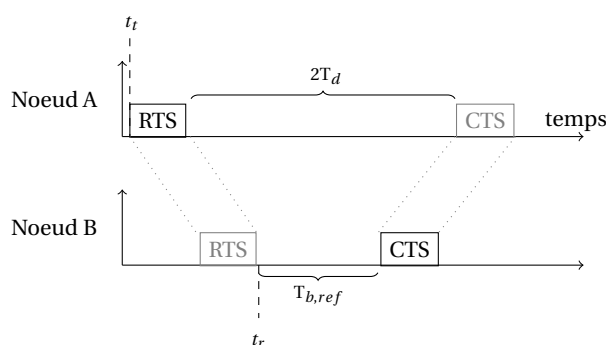


FIGURE 3.13 – Accès au média avec PCAP

Floor Acquisition Multiple Access (FAMA). Fullmer et Garcia-Luna-Aceves [FGLA95] identifient une condition nécessaire pour éviter que les données envoyées ne collisionnent entre elles. Une collision apparaît lorsque la latence des transmissions diffère selon l'éloignement de l'émetteur et du récepteur. La figure 3.14 illustre un scénario de collision, due à la présence de latences différentes.

Pour résoudre ce problème, Fullmer et Garcia-Luna-Aceves préconisent que les messages de type RTS aient une taille qui permet une transmission du message plus longue que le délai maxi-

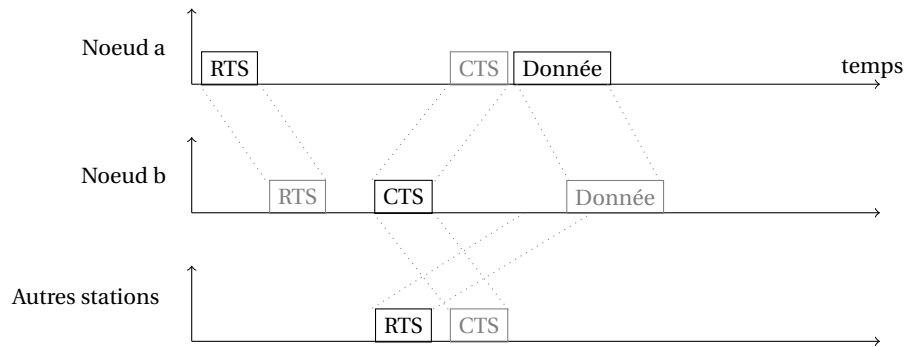


FIGURE 3.14 – Collision d'un RTS avec des données

mal de propagation. Les messages CTS doivent également avoir une taille plus grande que les messages RTS, fixée de telle sorte que le temps de transmission soit au plus du double du délai maximal de propagation. Ce mécanisme permet d'augmenter le succès de réception des messages CTS lorsqu'une collision se produit avec un message RTS. En effet, puisque le temps de transmission du message CTS est plus long, on s'assure qu'en cas de collision avec un message RTS la réception d'une partie du message CTS est assurée. Cependant, il en résulte des temps de transmission importants conduisant à une perte d'énergie. Dans le but de palier ce défaut, Molins et al. [MS06] introduisent la notion d'intervalle de temps appelé Slotted FAMA, via la discrétisation du temps en fonction du délai et du temps de transmission d'un message CTS.

Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA). Deng et al. [DH98] proposent ce protocole basé sur la division du canal acoustique en deux sous-canaux (utilisation de fréquences distinctes). L'un est utilisé pour l'envoi de données, l'autre pour l'envoi de messages de contrôle. Le protocole définit deux types de tonalité, une qui permet d'alerter les autres nœuds d'une transmission de données, une autre alertant de la réception de données. Ce protocole permet de résoudre le problème de la machine exposée (fig 3.11b) si la station D transmet des données à C, B en ne recevant que la tonalité de réception de C lui permet de savoir qu'il peut communiquer avec A. La séparation du média pour acheminer les données et les paquets de contrôles permet d'éviter la collision entre les messages de contrôle et de données.

Distance-Aware Collision Avoidance Protocol (DACAP). Le protocole proposé par Peleato et Stojanovic [PS07] offre une solution économe en énergie et capable de gérer la gigue afin d'éviter les collisions. Elle repose sur une connaissance de la position des nœuds calculée à partir du Round Trip Time (RTT) des messages RTS/CTS. Dans l'objectif d'éviter les collisions entre les paquets dû à une variation de délai importante, Peleato et Stojanovic introduisent l'utilisation d'un message de type alarme envoyé par un nœud ayant transmis un CTS au nœud émetteur du RTS. Lorsqu'un nœud émet un message RTS il se met automatiquement en attente durant une période définie en fonction de la distance avec le nœud destinataire du message. Par défaut cette période est fixée à deux fois le délai maximum de propagation d'un message. Une fois le message RTS reçu par le nœud destinataire, celui-ci envoie un message CTS. Si le nœud destinataire écoute sur le canal un paquet émis par un autre nœud que l'émetteur du message RTS, un message de type alarme est envoyé au nœud émetteur du RTS afin qu'il déferne sa transmission. Lorsque le média redevient libre, il recommence la procédure de négociation.

Tone Lohi (T-Lohi). Le protocole [SYH08b] [SYH08a] se positionne comme une alternative à la méthode classique du handshake via les messages RTS/CTS en introduisant le concept de réservation par contention. Lorsqu'une station veut accéder au média pour transmettre ses données, elle entre dans une période dite de réservation (reservation period) constituée de rounds de contention où la station tente de réserver le média (figure 3.15). Durant cette période, la station émet une tonalité indiquant aux autres nœuds son intention d'émettre, puis écoute le média. Durant ce

round si le nœud n'entend aucune autre tonalité, il considère alors qu'il n'y a pas de contention et met fin à la période de réservation et transmet ses données. Dans le cas contraire, si le nœud entend d'autres tonalités, il quitte le round de contention (mais reste toujours dans la phase de réservation) et lance une procédure de report pour attendre le prochain round de contention.

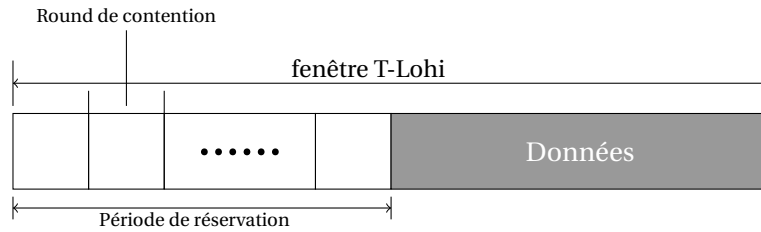


FIGURE 3.15 – Fonctionnement du protocole T-Lohi

Syed et al. proposent trois variantes du mécanisme de réservation du lien : une version synchronisée (ST-Lohi), une version asynchrone (cUT-Lohi) et une version dite agressive (aUT-Lohi) dans laquelle la durée du round de contention est réduite. La version synchronisée nécessite le maintien d'une horloge globale par tous les nœuds. Les communications (contention et données) sont synchronisées à l'intérieur d'intervalles de temps. La durée de la période de contention est $CT_{ST} = \tau_{max} + \tau_{tone}$ où τ_{max} correspond au pire temps de propagation et τ_{tone} le temps de détection d'une tonalité. Lorsqu'un nœud a des données à envoyer, il doit attendre le début d'un intervalle de temps pour démarrer le round de contention et les envoyer s'il remporte le round. Dans la version asynchrone, dite prudente (cUT-Lohi), aucune horloge globale n'est maintenue ce qui ne permet pas de définir des intervalles de temps. La garantie d'une détection de contention est assurée par le maintien d'une durée de contention plus longue fixée à $CT_{cUT} = 2 \times (\tau_{max} + \tau_{tone})$ afin de garantir la détection de contention, ce qui a pour effet de réduire le débit. Enfin la version asynchrone également dite agressive (aUT-Lohi) n'est pas soumise au problème de synchronisation ni au problème du maintien d'une longue période de contention. Dans cette version, la période de contention est réduite à $CT_{aUT} = \tau_{max} + \tau_{tone}$ et le nœud envoie ses données lorsqu'il n'entend aucun autre paquet de tonalité durant la phase de contention; dans le cas contraire il diffère sa transmission. Cette méthode permet donc aux nœuds d'avoir un caractère opportuniste, le nœud envoyant en premier son paquet de tonalité étant sûr d'accéder au média. Cette méthode permet d'accéder plus vite au média mais présente l'inconvénient d'augmenter la probabilité de collision.

3.4.2 Protocoles de retransmission des trames

L'accès au média par un nœud lui permet de transmettre ses données sur le réseau. Néanmoins il ne garantit pas la réception des données transmises au récepteur. L'ARQ est une technique de contrôle de transmission des données qui repose sur un mécanisme d'acquiescement et de timers qui a pour objectif de détecter la perte de paquets afin de parvenir à augmenter la fiabilité des communications. Ce processus est implémenté dans les protocoles effectuant un contrôle sur la perte et la corruption de paquets, qui sur détection de ces deux types d'erreurs demande la retransmission des données. L'utilisation d'acquiescements permet de confirmer la bonne réception du paquet ainsi que son intégrité. L'utilisation de timers permet de renouveler la transmission dans le cas de non-réception d'un acquiescement. Il est important de spécifier un nombre de retransmissions limité pour éviter un cycle infini. On retrouve généralement la présence d'un processus ARQ dans les couches hautes du modèle Open System Interconnection (OSI) comme par exemple le protocole TCP (couche transport) où la demande de retransmission se fait par le destinataire final. Néanmoins, cette approche est très limitée dans les réseaux sans fil. Tout d'abord, la probabilité de perte et le taux d'erreur dans les communications sans fil sont plus élevés que dans les réseaux filaires. Ensuite, la mobilité des nœuds dans les MANET implique souvent un changement de topologie qui ne permet parfois plus de retransmettre un paquet de bout en bout. Enfin, ce mécanisme devient inefficace dans les réseaux tolérants aux délais, car les timers (uti-

lisés pour détecter la perte d'acquittements) doivent prendre en compte la variation du délai (de bout en bout). Pour palier à ces problèmes, des méthodes ARQ ont été implémentés au niveau de la couche MAC. Les méthodes classiques ainsi que celles adaptées pour les réseaux sous-marins acoustiques sont décrites ci-dessous.

Approches courantes dans les réseaux sans fil

Historiquement, les premières approches utilisaient uniquement un mécanisme d'acquittement de trames. Le Stop-and-Wait est la plus simple des méthodes de ce type [BS72]. Lorsqu'une station envoie une trame, elle attend la réception d'un acquittement pour continuer l'envoi des trames de donnée suivantes. L'utilisation d'un timer permet de déterminer au niveau de l'émetteur les trames perdues ou fortement retardées et de déclencher leur réémission. Il peut arriver qu'une trame reçue par le récepteur soit dupliquée, une détection est donc effectuée par l'usage d'un numéro de séquence qui est attribué de manière unique et qui permet de savoir quel numéro de trame est attendu. L'utilisation de la technique Stop-and-Wait est parfaitement appropriée dans les réseaux sans fil, puisque les communications sont en half duplex. Cependant, elle est peu performante du fait de l'envoi d'un acquittement pour chaque message, ce qui limite la bande passante allouée aux données. Pour optimiser le débit, la technique Go-Back-N définit une fenêtre glissante maintenue par l'émetteur. Cette fenêtre contient une liste des trames à envoyer sans attendre d'acquittement. Elle permet ainsi la transmission de données consécutives, à l'inverse du Stop-and-Wait. Pour chaque acquittement reçu, la fenêtre de l'émetteur est décalée ce qui permet d'envoyer de nouvelles données (non transmises auparavant). Si une trame n'est pas acquittée (ex : perte ou taux d'erreur trop important), l'émetteur va alors retransmettre une série de trames (située dans la fenêtre courante) à partir de celle perdue. Bien que la technique du Go-Back-N permet une gestion plus efficace de l'envoi des trames que le Stop-and-Wait, elle impose en cas de perte d'une trame la retransmission d'une série de trames. Afin de minimiser le nombre de paquets retransmis la technique Selective Repeat ARQ permet d'envoyer uniquement les trames perdues.

Les techniques de type Stop-and-Wait, Go-Back-N ARQ et Selective Repeat ARQ ne permettent que de retransmettre les trames perdues ou corrompues. Dans le but d'améliorer les performances d'acheminement des trames, Wozencraft et Horstein [WH61] [WH60] introduisent la technique Hybrid-ARQ (H-ARQ). Celle-ci inclut à la fois un mécanisme de détection et de correction d'erreurs et une méthode de retransmission de trames. Trois types de techniques hybrides sont à distinguer. Le premier (Type-I H-ARQ) repose sur l'ajout d'un code de détection d'erreurs ainsi qu'un code correcteur dans la trame de données. Lorsqu'une trame réceptionnée contient peu d'erreurs, celles-ci peuvent être corrigées par le code correcteur. Toutefois, si le nombre d'erreurs est trop important pour le code, la trame est rejetée et donc non acquittée ce qui provoque sa retransmission par l'émetteur. Les deux autres types, Type-II H-ARQ et Type-III H-ARQ utilisent des techniques plus complexes afin d'améliorer la détection et la correction des erreurs dans les trames afin d'augmenter le débit [EBBS04].

Les techniques ARQ et plus spécifiquement les techniques hybrides sont couramment utilisées dans les communications sans fil. Les réseaux Wi-Fi utilisent une version partielle du Type-I H-ARQ où la trame contient seulement le code détecteur et se base sur l'algorithme Stop-and-Wait pour la retransmission [IEE12] [SM99]. On retrouve l'emploi du mécanisme H-ARQ dans d'autres technologies telles que les réseaux WiMAX encore les réseaux cellulaires [Bes03] [CGVS10].

Approche dans les réseaux sous-marins acoustique

Les protocoles de type ARQ permettent d'établir des liens fiables entre deux stations. Historiquement ces protocoles ont été conçus pour être utilisés dans les réseaux sans fil terrestres. Or, les communications acoustiques sous-marines sont caractérisées par une faible qualité de lien et une gigue importante. Les réseaux acoustiques se distinguent donc des réseaux terrestres par la présence de délais de transmission importants et d'un taux d'erreur potentiellement élevé.

Stojanovic [Sto05] présente une analyse du protocole de la technique Stop-And-Wait ainsi que de ses variantes reposant sur l’acquittement d’un groupe de paquets reçus. L’auteur justifie l’utilisation de cette technique, conçue pour le milieu half duplex. L’auteur montre que l’utilisation d’acquittements de groupe permet une meilleure utilisation du lien et montre que plus le nombre de messages sans acquittement est important moins le problème du délai de propagation est significatif. Parallèlement les timers doivent être fixés pour prendre en compte le délai de propagation du message en fonction de la distance des nœuds. Enfin, l’auteur montre que plus le taux d’erreur augmente plus il est souhaitable de transmettre des paquets de petite taille. Kwatra [Kwa13] analyse la technique du Go-Back-N ARQ et étudie le taux de perte de trames en fonction de la distance des nœuds, de la taille de la fenêtre maintenue par l’émetteur suivant deux débits différents : 50 kps et 16 kps. L’auteur confirme l’observation faite par Stojanovic [Sto05] selon laquelle une fenêtre plus grande permet de réduire le taux de perte de trames et d’utiliser au mieux la bande passante disponible. La présence d’un taux important d’erreurs, rend l’utilisation de l’hybride ARQ plus propice. Plusieurs protocoles ont été proposés comme l’UW-HARQ [MMA⁺12] basé sur un HARQ de type I ou encore le protocole de Yu et al. [YCXC14] basé sur un HARQ de type II. Les études réalisées par les auteurs respectifs sur l’évaluation de performance montrent que ces protocoles offrent de meilleurs débits [MMA⁺12] [YCXC14] et des délais transmission réduits [YCXC14].

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps décrit et classé les différents types de MANETs. Nous avons ensuite détaillé les différents phénomènes physiques qui régissent la propagation des ondes électromagnétiques dans l’air et des ondes acoustiques dans l’eau de mer. Cela a permis de constater que les signaux acoustiques se propagent sur de plus grandes distances que les ondes électromagnétiques, mais au prix d’un débit très inférieur du fait de l’utilisation de fréquences beaucoup plus basses. Nous avons également noté que les délais de propagation ainsi que la gigue des signaux acoustiques étaient considérables, ce qui constitue un obstacle majeur pour l’accès au média. En effet, les techniques traditionnelles telles que le CSMA deviennent inefficaces dans les réseaux acoustiques sous-marins. La portée importante du signal ainsi que sa faible célérité ont pour effet d’engendrer de nombreuses collisions dans un réseau. Néanmoins, les solutions proposées n’ont pas permis de résoudre ce problème de manière efficace, qui reste encore ouvert aujourd’hui.

Ces différences, nous ont permis de constater que les mécanismes des couches basses (physique et liaison de données) sont inéluctablement différents. Il est donc intéressant de voir comment les couches supérieures s’adaptent aux spécificités de ces deux types de réseaux. Les réseaux acoustiques sous-marins se présentent comme ceux présentant le plus de contraintes, avec un faible débit, une latence importante et un taux de perte de paquets potentiellement important. La couche réseau du modèle OSI a pour objectif de masquer les spécificités des couches basses en proposant un service d’adressage virtuel accompagné d’un service de routage pour acheminer les données de bout en bout.

L’état de l’art de ce chapitre devra donc se poursuivre en se focalisant sur la couche réseau et notamment sur les protocoles de routage. L’étude de ces protocoles permettra de comprendre comment les spécificités de chaque type de réseau sont gérées et comment les systèmes autonomes peuvent interopérer entre eux. C’est pourquoi l’ensemble des protocoles de routage font l’objet de notre prochain chapitre.

Chapitre 4

Techniques de découverte de voisinage, de routage et modèles associés

« Information is the resolution of uncertainty. »

Claude Shannon

Sommaire

4.1 Introduction	57
4.2 Estimation de la qualité de lien dans les réseaux sans fil	59
4.2.1 Notions fondamentales	59
4.2.2 Estimateurs basés sur des informations physiques	61
4.2.3 Estimateurs basés sur des informations logiques	62
4.3 Découverte de voisinage dans les réseaux sous-marins	64
4.3.1 Méthodes basées sur un nœud maître	64
4.3.2 Méthodes basées sur une approche opportuniste	65
4.3.3 Discussion	66
4.4 Protocoles de routage pour les réseaux terrestres	66
4.4.1 Protocoles pour les MANETs	66
4.4.2 Protocole de routage DTN	70
4.5 Protocoles de routage dans les réseaux sous-marins	73
4.5.1 Protocoles pour les MANETs	73
4.5.2 Protocoles de routages DTN sous-marins	75
4.6 Modèles associés	77
4.6.1 Modèle GRS	77
4.6.2 Modèle DAGRS	78
4.6.3 Modèle ADAGRS	79
4.7 Conclusion	80

4.1 Introduction

Nous poursuivons notre investigation sur les réseaux terrestres et sous-marins en étudiant les protocoles de routage et les mécanismes associés utilisés dans les réseaux terrestres et sous-marins. Ces réseaux possèdent des propriétés de communication différentes (médias différents) mais également des propriétés topologiques distinctes (vitesse et densité des nœuds différentes).

Ces caractéristiques doivent être prises en compte par les protocoles afin d’être efficaces. La figure 4.1 montre les différentes stratégies de routage à utiliser en fonction de la densité du réseau et de la vitesse des nœuds.

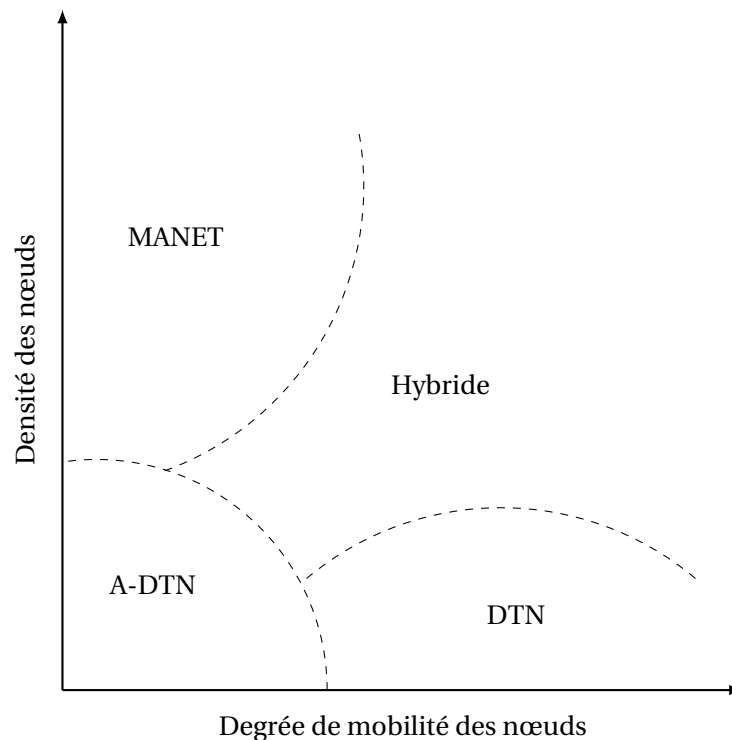


FIGURE 4.1 – Taxonomie des principes de routage

Les protocoles MANETs sont adaptés pour les réseaux où la densité de nœuds est élevée mais avec une faible vitesse. Les réseaux DTNs sont plus efficaces lorsque la densité est faible et que la vitesse des nœuds est élevée. Lorsque les nœuds sont répartis de façon éparse et qu’ils possèdent une très faible vitesse ou bien statiques, les protocoles de type Assisted DTNs (A-DTN)¹ [BAZ07] sont les plus performants. Lorsque la vitesse et la densité des nœuds évoluent fortement dans un réseau, il est nécessaire d’utiliser une politique de routage hybride combinant une approche MANET et DTN. Afin de déterminer le meilleur chemin, un protocole de routage s’appuie sur un mécanisme d’évaluation des chemins. Dans les réseaux terrestres, cette évaluation porte sur la qualité des liens, autrement dit sa capacité à transmettre les paquets avec succès. Ces techniques d’estimation génèrent toutefois trop de transmission pour les réseaux acoustiques sous-marins. Ces techniques se basent alors principalement sur des informations de localisation afin de limiter leur nombre. Afin de concevoir des algorithmes et de les modéliser nous nous appuyons sur un formalisme de ré-étiquetage de graphes qui nous permettra de représenter des algorithmes distribués.

Ce chapitre est composé de cinq parties. La première aborde les techniques d’estimations de qualité de lien dans les réseaux sans fil terrestres. La seconde présente les techniques de découverte et d’évaluation du voisinage dans les réseaux sous-marins. La troisième décrit les protocoles de routage MANET et DTN pour les réseaux terrestres. La quatrième partie aborde ces protocoles pour les réseaux acoustiques sous-marins. Enfin, la cinquième partie décrit le formalisme du ré-étiquetage de graphe.

1. Réseaux dans lesquels quelques nœuds sont mobiles.

4.2 Estimation de la qualité de lien dans les réseaux sans fil

Historiquement, les métriques utilisées par les protocoles de routage n'effectuaient qu'une estimation de la distance entre deux nœuds en ne prenant en compte que le nombre de sauts à effectuer pour atteindre une station. De Couto et al. [DCACM03] démontrent les faiblesses de cette estimation par deux expérimentations, l'une se déroulant dans un environnement intérieur, l'autre en extérieur. Ils montrent à travers l'utilisation du protocole Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) qu'une métrique ne prenant en compte que le nombre de sauts sélectionne fréquemment des chemins non-optimaux. Ils montrent que 30% des chemins sélectionnés par le protocole de routage sont inutilisables et que seuls 40% des routes sélectionnés possèdent un taux de délivrance supérieur à 90%. Afin de palier les faiblesses de l'estimation du nombre de sauts, une nouvelle génération d'estimateurs a été développée pour évaluer la qualité du lien.

4.2.1 Notions fondamentales

Les estimateurs de qualité de lien doivent évaluer de manière précise et rapide le lien afin de remonter cette information pour d'autres applications. Il est donc important de définir des critères pertinents pour évaluer les performances d'un estimateur.

Conception d'un estimateur de qualité de lien

La première étape est la surveillance du trafic sur le réseau. La technique la plus répandue consiste à maintenir un historique des paquets reçus/envoyés. L'état de réception des paquets est alors déterminé à partir des informations de cet historique par exemple un numéro de séquence (Sequence Number (SN)), donnée temporelle ou encore la force du signal Received Signal Strength Indication (RSSI). La dernière étape consiste à estimer la qualité d'un lien à partir de techniques d'estimations telles que des méthodes statistiques, de filtrage ou encore de logique floue.

Surveillance du trafic. Il existe trois types de surveillance de lien : active, passive et hybride. Dans le cadre de la surveillance active (i) un nœud sonde périodiquement les liens par l'envoi de paquets de sonde. Ces paquets peuvent être envoyés soit en broadcast [DCABM03] soit en unicast [KS06]. La période d'envoi doit être définie en fonction des contraintes énergétiques et de la précision de la surveillance du lien souhaitée dans le but de concilier précision et trafic généré (overhead) [GFJ⁺09]. L'utilisation de paquet envoyé en broadcast est la solution la plus simple, générant moins d'overhead que l'unicast, puisque que la transmission d'un paquet permet d'atteindre tous les nœuds voisins. La technique de surveillance passive (ii) exploite le trafic existant sans générer des paquets de sonde. Chaque nœud effectue une sur-écoute du canal afin de capter toutes les transmissions même si le paquet ne lui est pas destiné. L'utilisation de la surveillance passive est largement répandue dans les réseaux possédant de fortes contraintes énergétiques. Cependant pour garder une estimation à jour, les nœuds doivent en permanence écouter le canal même si celui-ci est libre. De plus, lorsque le trafic généré est faible ou non uniformément réparti, l'écoute du canal devient alors insuffisante pour fournir des mesures précises. Enfin, la technique hybride (iii) combine une approche active et passive pour obtenir un compromis entre efficacité énergétique et fraîcheur de la mesure. La technique de surveillance coopérative introduite par Kim et Shin [KS06] utilise une technique hybride combinant une approche active, passive et coopérative. L'approche coopérative permet à un nœud d'avertir ses voisins qu'un paquet de sondes va être envoyé afin que les autres nœuds effectuent une sur-écoute du canal pour évaluer la qualité du lien et ainsi permettre d'éviter aux nœuds de rester dans une phase de sur-écoute permanente.

Mesure du lien. La mesure d'un lien est effectuée en utilisant les informations à partir des paquets reçus/acquittés ou bien des paquets envoyés. Ces données peuvent être les numéros de séquence, les données temporelles ou encore le RSSI et permettent au récepteur de calculer la qualité du lien descendant. La mesure de la qualité du lien ascendant ne peut se faire que si les

nœuds échangent leurs estimations sur le lien descendant. Une autre approche consiste à retransmettre les paquets reçus pour renvoyer à l'émetteur son propre paquet. Cette stratégie donne une information sur le lien descendant au niveau du récepteur puis une fois retransmis, donne une information sur le lien ascendant et descendant au niveau de l'émetteur qui reçoit son propre paquet.

Calcul de la métrique. Le calcul de la métrique repose essentiellement sur une technique d'estimation qui utilise les mesures effectuées sur le lien. Il existe plusieurs techniques d'estimations basées sur des méthodes heuristiques, d'apprentissage, de filtrage de données, de régression ou encore de la logique floue.

Caractéristique d'un estimateur

L'efficacité d'un estimateur ne se base pas uniquement sur la précision de l'estimation. En effet, un estimateur est jugé sur quatre caractéristiques : (i) sa consommation énergétique, (ii) sa précision, (iii) sa sensibilité et (iv) sa stabilité.

Efficacité énergétique. La consommation énergétique est un aspect crucial puisque la durée de vie des nœuds dépend de la capacité de la batterie embarquée. Les estimateurs complexes sont très consommateurs en énergie et donc inappropriés. Lors de l'utilisation d'une technique de surveillance active, la période d'envoi des paquets de sondes doit également être prise en compte afin de limiter le nombre de transmissions.

Précision. La précision est la capacité de l'estimateur à caractériser correctement l'état du lien autrement dit son comportement réel.

Sensibilité. La sensibilité des estimateurs traduit leur capacité à réagir rapidement aux changements d'états du lien. Elle dépend de plusieurs facteurs tels que la taille de l'historique et le type de surveillance du trafic. Le maintien d'un historique réduit couplé à un processus de surveillance de trafic actif dont la période d'envoi est réduite permet d'avoir un estimateur réactif, mais des paramètres contraires rendent celui-ci peu réactif. Une sensibilité excessive peut entraîner une sur-estimation du changement d'état du lien tandis qu'une faible sensibilité tend à le sous-estimer.

Stabilité. La stabilité désigne la capacité d'un estimateur à tolérer les changements éphémères de qualité de lien. Elle permet d'éviter aux algorithmes et applications d'effectuer de nouveaux calculs lors de changements transitoires de la qualité d'un lien. La sensibilité et la stabilité sont toutefois des propriétés contraires ce qui pose un problème lors de la conception d'un estimateur. Pour l'illustrer, nous donnons un exemple à travers l'utilisation du filtre Exponentially Weighted Moving Average (EWMA). L'équation 4.1 montre que la moyenne est calculée en utilisant un système de pondération exponentielle qui privilégie soit les valeurs les plus récentes soit les plus anciennes :

$$S_t = \alpha \cdot Y_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1} \quad (4.1)$$

Avec α la pondération associée aux données, Y_t la valeur à l'instant t de la série Y et S_t la moyenne calculée. La valeur α influence la pondération ; lorsque $\alpha \rightarrow 0$ le calcul donne plus d'importance aux valeurs plus anciennes ce qui permet d'avoir une moyenne lissée et donc d'obtenir une estimation stable. Lorsque $\alpha \rightarrow 1$ la moyenne fluctue plus rapidement, ce qui permet d'avoir une estimation réactive (mais instable). Le caractère opposé de la sensibilité et de la stabilité rend difficile la conception d'un estimateur capable de remplir ces deux conditions. Il est possible d'avoir un compromis entre ces caractéristiques par exemple avec un facteur $\alpha = 0.5$ pour l'EWMA. Une autre solution consiste à combiner plusieurs estimateurs pour fournir une estimation à court et à long terme comme suggéré par Renner et al. avec HoPS [REWT11].

4.2.2 Estimateurs basés sur des informations physiques

Les estimateurs basés sur des informations physiques utilisent les informations de la couche physique pour évaluer la qualité du lien. Ce type de métrique présente l'avantage de fournir une information immédiate sur l'état du lien dès la réception d'un paquet. Le coût d'utilisation de ces métriques est supporté par le matériel de l'interface réseau et permet d'obtenir une information rapidement en se basant sur le trafic réseau. On dénote trois estimateurs historiques qui sont implémentés sur la majorité des interfaces réseaux : RSSI, SNR et Link Quality Indicator (LQI) (uniquement disponible pour le 802.15.4). D'autres estimateurs dits de nouvelle génération ont ensuite été développés qui exploitent les informations du processus de décodage de la réception des trames pour estimer la qualité du lien.

L'information donnée par la mesure du RSSI porte sur la puissance de réception d'un signal reçu autrement dit son intensité [BKM⁺12]. Srinivasan et Levis [SL06] affirment qu'une métrique basée sur le RSSI donne une indication précise sur l'état du lien lorsqu'il est de bonne qualité. Ils montrent également que lorsque la valeur du RSSI est supérieure à -87dBm (valeur qui dépend du chipset radio), la valeur du PRR est très élevée (95%). Toutefois une simple lecture de la valeur du RSSI est insuffisante pour déterminer précisément le PRR comme le montre la figure 4.2a.

Le SNR se calcule comme le ratio entre la puissance du signal reçu et le bruit [BKM⁺12]. De manière théorique pour une modulation donnée, le SNR permet de connaître le Bit Error Rate (BER) et qui peut être extrapolé au Packet Error Rate (PER) et donc au Packet Reception Ratio (PRR) [ZK07]. Des études expérimentales montrent que la relation entre SNR le PRR n'est pas aisément déductible. Le taux de corrélation dépend des performances du récepteur ainsi que de l'environnement de propagation du signal comme la température [SCL⁺07]. Son et al [SKH06] montrent avec un modèle de régression, qu'il existe une forte corrélation entre une estimation basée sur le Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) (ratio entre la puissance du signal reçu et la somme des puissances des interférences et du bruit) et le PRR et que pour un taux de SINR dépassant un seuil, un taux élevé de PRR est garanti. Cependant, ce seuil, en fonction de la puissance de transmission, peut varier jusqu'à 6dB . Bien que la corrélation entre le SNR soit plus élevée avec le PRR que ne l'est le RSSI, une simple lecture reste toutefois insuffisante pour déterminer le PRR, comme le montre la figure 4.2b.

Le LQI a été proposé dans le standard IEEE 802.15.4 mais son implémentation est spécifique aux fabricants d'interfaces réseau [BKM⁺12]. Le chipset radio le plus répandu, le CC2420, donne une estimation de la qualité basée un score entre 50 et 110 (plus la valeur est haute, meilleure est la qualité). La métrique présente un meilleur taux de corrélation avec le PRR que le RSSI et le SNR [SDTL10] (figure 4.2c). Néanmoins, une simple lecture de la valeur du LQI est insuffisante pour déterminer la qualité d'un lien, notamment lorsqu'elle est instable. Srinivasan et Levis [SL06] montrent que lorsqu'un lien est en phase intermédiaire ou de mauvaise qualité, la valeur du LQI subit d'importantes variations. Boano et al [BVD⁺09] proposent alors d'utiliser cette variation, néanmoins les auteurs ne fournissent pas de modèle mathématique qui permet de les exploiter.

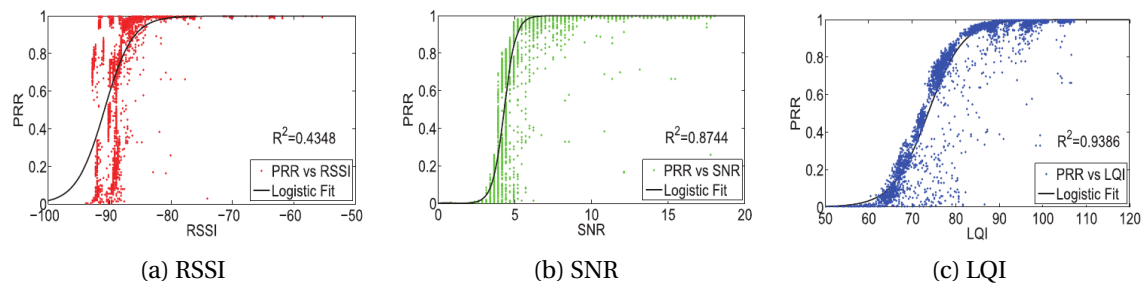


FIGURE 4.2 – PRR en fonction du RSSI, du SNR et du LQI [LC14]

Heinzer et al. [HLL12] proposent un indicateur appelé CEPS basé sur les erreurs détectées sur les symboles (utilisés pour la modulation et démodulation du signal) par la puce radio utilisant la technique du Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). La corrélation entre les valeurs don-

nées par la métrique et le PRR peut être approximée par une simple régression linéaire. Spuhler et al [SLG13] proposent un indicateur appelé BLITZ qui analyse la trame de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur pour déterminer le PRR. Contrairement à celui conçu par Heinzer et al. [HLL12] celui-ci ne requiert pas l'entière réception de la trame mais uniquement la fenêtre de synchronisation. Le calcul du Packet Delivery Ratio (PDR) repose sur une estimation instantanée qui est moyennée puis filtrée. La première étape du calcul consiste à estimer le PDR instantané après la réception du préambule du paquet. Dans le but de rendre la métrique plus stable, les valeurs instantanées sont moyennées et filtrées avec une moyenne mobile exponentielle (EWMA) afin d'atténuer les fluctuations de la métrique et obtenir la valeur du PDR. Gabteni et al. [GHD⁺14] proposent une métrique prédictive d'état de lien en se basant sur le processus de décodage OFDM. Contrairement aux solutions précédentes, la métrique exploite à la fois le préambule et la charge utile (payload) et se base sur le processus de décodage OFDM. Le processus de réception repose sur quatre phases : le début de la réception de la trame, la fin du préambule, la fin de l'entête et la fin de la réception. À partir des informations collectées lors de la réception, trois estimateurs sont calculés afin de déterminer l'état de lien : (i) Connecté, (ii) Transitoire et (iii) Déconnecté. La caractéristique prédictive de la métrique vient du fait que les pertes sont détectées à la fois au niveau physique et au niveau logique. Cela permet donc de classer le type de perte survenue afin d'anticiper la perte d'un lien.

Les estimateurs physiques peuvent être classés en deux catégories. La première regroupe l'ensemble des estimateurs dit classiques qui incluent le RSSI, SNR et LQI et les estimateurs de nouvelles générations qui exploitent les informations retournées par le processus de décodage du chipset radio. Les estimateurs dit classiques ont l'avantage d'offrir une information rapide sur la qualité du lien, mais ne permettent pas d'en déduire le PRR aisément. Ceux de nouvelle génération utilisent le processus de décodage pour exploiter un nouveau type d'information. Les techniques proposées par Heinzer et al. et Spuhler et al. utilisent les informations du processus de décodage avec la technique du DSSS. Ces techniques permettent d'obtenir une information sur le PRR à partir des erreurs sur les symboles liés à la charge utile pour Spuhler et al. et à partir de la trame de synchronisation pour Heinzer et al. Ces métriques présentent l'avantage d'être à la fois stables et réactives tout en donnant une information pouvant être corrélée plus facilement avec le PRR avec une erreur absolue allant jusqu'à 30% pour CEPS et 20% pour BLITZ [SLG13]. Au contraire la solution proposée par Gabteni et al. exploite les informations retournées par le processus de décodage OFDM pour en déduire le niveau de perte, autrement dit une perte au niveau Couche physique du modèle OSI, ou *Physical layer of the OSI model* ou MAC dans le but de prédire l'état d'un lien. Cette différenciation offre l'avantage de fournir une prédiction sur la disparition d'un lien. Néanmoins l'utilisation de ces métriques nécessite l'exploitation des informations données par le chipset radio et donc l'utilisation d'interfaces réseau spécifiques. Enfin, Liu et Cerpa [LC14] ont conçu une métrique exploitant un modèle de prédiction basé sur un apprentissage automatique de type Machine learning. Ils utilisent trois types de Machine learning supervisés à savoir une classification naïve bayésienne, une régression linéaire et un réseau de neurones. À partir des informations physiques et celle du PRR, les auteurs tentent de déterminer la probabilité de réception du prochain paquet. Ils montrent que les prédictions obtenues par une régression linéaire permettent d'obtenir le meilleur ratio entre performance et coût de calcul. Néanmoins, les méthodes de prédictions nécessitent un temps d'entraînement conséquent pour pouvoir être efficaces (environ dix minutes).

4.2.3 Estimateurs basés sur des informations logiques

Ces métriques présentent l'avantage de ne pas être dépendantes du matériel utilisé et dont les estimations corréleront directement avec les besoins de l'application. Elles peuvent être classées en trois catégories : (i) basées sur le PRR, (ii) basées sur le Required Number of Packet transmission (RNP) et (iii) basées sur un score qui identifie la qualité du lien.

La métrique de type PRR est calculée au niveau du récepteur et est considérée comme la plus simple. Elle sert également de référence pour l'évaluation des métriques physiques, une métrique

dont l'estimation corrèle avec PRR est considérée comme une métrique utilisable. Son efficacité dépend de la taille de la fenêtre utilisée. Cerpa et al. [CWK⁺05] montrent que seul le maintien d'une fenêtre réduite permet d'avoir une qualité précise pour des liens ayant un faible PRR. Lorsqu'un lien possède un PRR moyen, le maintien d'une fenêtre plus grande sera alors nécessaire pour constituer un historique important pour mieux évaluer le PRR. Woo et Culler [WC03] proposent un estimateur de qualité de lien, le Window Mean Exponentially Weighted Moving Average (WMEWMA) calculant le succès moyen de réception d'un paquet sur une période définie. L'estimateur $WMEWMA(t, \alpha)$ repose sur l'utilisation de deux paramètres à savoir une fenêtre temporelle t qui représente le nombre de messages reçus entre deux événements et α qui contrôle le degré de croissance des poids applicables aux événements observés. L'estimateur est jugé stable du fait qu'il atténue l'estimation du PRR mais reste néanmoins suffisamment agile pour détecter les changements rapides. L'utilisation de métriques qui évaluent ou approximent le PRR quantifie la qualité du lien descendant. Le PRR se positionne comme une métrique de référence pour comparer l'efficacité et la précision des métriques physiques mais ne peut quantifier les pertes totales d'un lien et a tendance à sur ou sous-estimer les pertes survenues sur le lien.

Les métriques de type RNP estiment le nombre de transmissions d'un paquet afin qu'il soit reçu avec succès. Cerpa et al [CWPE05] proposent l'utilisation d'une métrique qui compte le nombre de retransmissions nécessaires pour transmettre un paquet avec succès. Il est donc nécessaire de maintenir un processus de type ARQ afin que le nœud puisse ré-émettre les paquets non acquittés jusqu'à ce qu'ils soient correctement reçus. Une métrique similaire appelée Acknowledgment Reception Ratio (ARR) calcule le ratio entre les Acquittement (ACK) reçus et le nombre total de paquets envoyés durant une fenêtre temporelle pré-définie. De Couto et al. [DCABM03] proposent une métrique appelée Expected Transmission Count (ETX) qui se base sur l'utilisation d'une méthode active de surveillance de lien. La métrique est calculée à partir de deux ratios appelés le "forward ratio" d_f qui correspond au nombre de paquets transmis avec succès et le "backward delivery ratio" d_r correspondant au nombre de paquets reçus (ACK). Lorsque les paquets sont envoyés en broadcast, la probabilité d_r peut être assimilée au PRR. La métrique Four-bit [FGJL07] combine des informations provenant de la couche physique et de la couche réseau pour fournir quatre bits d'information. Le bit "blanc" représente la qualité du lien physique par la mesure du taux d'erreurs de décodage des paquets reçus. Le bit "ack" indique la réception d'un acquittement pour un paquet reçu. Les bits "pin" et "compare" sont utilisés pour définir les politiques de changement dans les tables de routage. Lal et al. [LMH⁺03] ont conçu la métrique Link Inefficiency (LI) qui estime RNP en se basant sur une écoute passive pour déterminer l'inverse du Packet Success Probability (PSP). La PSP est calculée à partir d'une fonction mathématique et permet de faire corréler la moyenne du SNR avec le PSP. Les métriques L-NT et L-ETX [ZSA09] fournissent une estimation de la qualité de lien basées sur le retour d'information à partir de la réception de paquets unicast. L'estimateur L-NT compte le nombre de transmissions nécessaires à la réception d'un paquet en appliquant un filtre de type EWMA. L-ETX estime la qualité d'un lien en calculant le ratio entre le nombre d'ACK et le nombre de paquets transmis moyenné par un filtre EWMA. Cerpa et al. [CWPE05] ont mesuré sur différents liens les valeurs du PRR et RNP. Bien que le PRR et le Requested Number of Packets (NRP) suivent la même tendance, le PRR tend à surestimer la qualité du lien puisqu'elle ne prend en compte que les pertes qui surviennent sur le lien descendant. Par conséquent les métriques basées sur une mesure du RNP donnent une estimation plus fiable de la qualité du lien.

Le développement de métriques basées sur un score provient de l'observation que les métriques classiques estiment la qualité d'un lien en fonction d'une valeur unique. Cette représentation ne permet que d'évaluer l'état d'un lien à travers une valeur unique ce qui limite l'interprétation de son état. Dans le but de palier ce défaut, des métriques qui utilisent plusieurs types d'estimateurs ont été conçues. Fuzzy-LQE (F-LQE) [BKY⁺10] est une métrique calculée du côté du récepteur et utilise plusieurs estimateurs chacun évaluant une propriété différente du lien. La métrique est composée d'un estimateur de PRR nommé Smoothed PRR (SPRR), d'un indicateur de stabilité de lien (link Stability Factor (SF)), d'un indicateur de niveau d'asymétrie du lien (ASyme-

tric Link level (ASL)) et d'un indicateur de qualité du canal (Average Signal to Noise Ratio (ASNR)). L'ensemble des valeurs retournées par ces indicateurs sont agrégées suivant une règle de logique floue (Fuzzy logic) [Zad75] afin de définir un score indiquant la bonne ou mauvaise qualité du lien. La métrique Holistic Packet Statistics (HoPS) [REW11] est une métrique similaire à F-LQE mais qui utilise une approche heuristique et qui se compose de quatre estimateurs. Le premier donne une estimation à court terme du taux de paquets reçus. Le second estimateur se base sur le premier afin de donner une estimation à long terme via l'utilisation du filtre EWMA. Le troisième calcule la stabilité du lien et le quatrième donne la tendance du lien. Ces différents estimateurs sont agrégés suivant deux approches, une première dite dynamique prenant en compte l'ensemble des valeurs retournées par les estimateurs et une seconde dite prédictive où seules les estimations à long terme, les estimateurs de stabilité et de tendance sont pris en compte. Xu et Lee [XL06] proposent une métrique (Weighted Regression Estimator (WRE)) qui évalue la qualité d'un lien en fonction de la distance des nœuds. Les auteurs avancent qu'il existe une corrélation entre la force du signal reçu et la distance euclidienne des nœuds, pour ainsi déterminer la qualité du lien en fonction de la distance. Pour cela la métrique se base sur un modèle de régression prenant en paramètre la position des nœuds ainsi que la qualité des liens. L'accroissement du trafic généré permet d'affiner le modèle pour donner une estimation de la qualité du lien en fonction de la distance entre les nœuds. MetricMap [WMP07] est une métrique utilisée par le protocole hiérarchique MintRoute. Elle est composée de différents estimateurs évaluant le RSSI, le taux d'utilisation du canal ainsi que la profondeur du nœud dans la hiérarchie pour classer les liens selon différentes catégories (e.g. bon, mauvais).

Les estimateurs utilisant des informations logiques peuvent opérer depuis la couche MAC jusqu'à la couche applicative et contrairement aux estimateurs physiques, leur performance ne dépend pas du matériel. Ils peuvent détecter la perte de paquets contrairement aux estimateurs physiques. La qualité d'un lien est évaluée en fonction du PRR, RNP ou bien en utilisant plusieurs estimateurs. Les métriques basées sur le PRR ont tendance à surestimer la qualité du lien en ne prenant en compte que les pertes survenues sur le lien descendant. Au contraire, les métriques basées sur le RNP évaluent la qualité d'un lien en comptant les pertes du lien ascendant et descendant. Enfin, les métriques évaluant la qualité d'un lien à travers plusieurs estimateurs permettent une évaluation multi-facette du lien comme F-LQE ou HoPS. Cependant, à l'heure actuelle ces estimateurs ne sont principalement développés que pour les réseaux de capteurs statiques.

4.3 Découverte de voisinage dans les réseaux sous-marins

Dans le chapitre précédent, il a été montré que les réseaux sous-marins privilégiaient le canal de propagation acoustique et utilisaient des mécanismes MAC spécifiques. Les communications dans ce milieu se distinguent des communications terrestres par l'importante portée du signal et le faible débit qui en résulte. Ces caractéristiques doivent être prises en compte par les techniques de découverte de voisinage. La première discussion fut ouverte par Proakis et al. [PSRS01] qui soulignaient que les protocoles de routage devaient prendre en compte la mobilité des nœuds, ainsi que le temps de propagation des messages et la présence de liens unidirectionnels. Afin de détecter la présence de nœuds, les protocoles s'appuient sur des techniques de découverte que l'on peut classer en deux catégories : celles initiées par un nœud maître et celles dites opportunistes.

4.3.1 Méthodes basées sur un nœud maître

Rice et Wei [RO10] proposent un protocole de découverte de voisinage pour le réseau Seaweb [RCF⁺01] comprenant des capteurs et des véhicules. Le protocole de découverte repose sur une architecture centralisée autour d'un nœud maître. Ce nœud central commande l'ensemble du processus de découverte en agrégeant les routes découvertes dans une table de routage globale unique. La découverte de l'ensemble des routes se fait de manière itérative en utilisant des paquets de sonde comme le montre la figure 4.3.

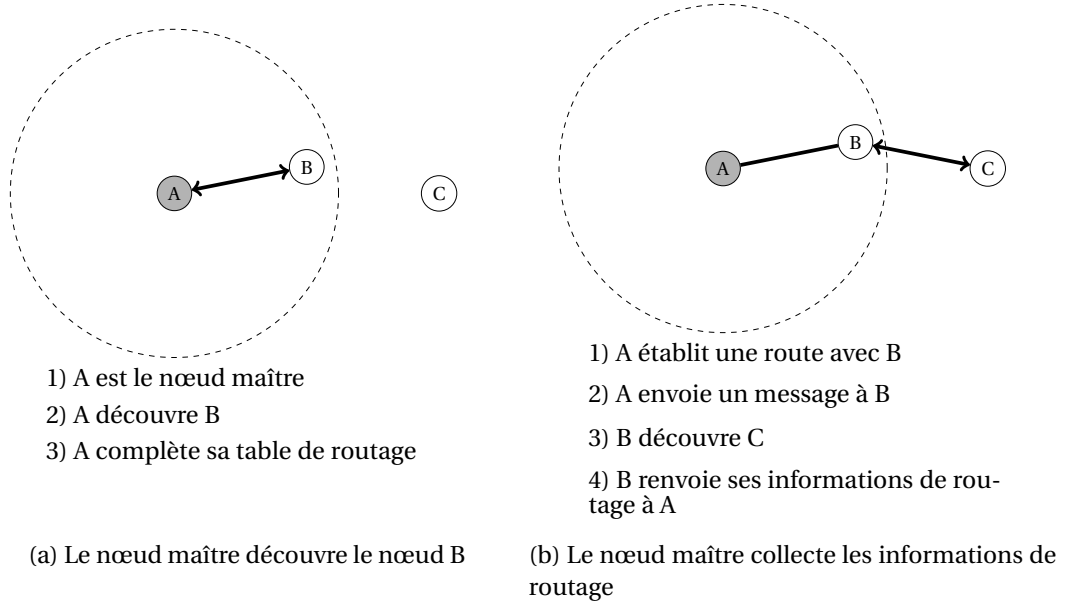


FIGURE 4.3 – Processus de découverte des liens de Rice et Wei. [RO10]

Pour choisir la meilleure route, le nœud maître utilise la fonction de coût suivante :

$$C_i = \sum_{j=1}^h \left[\left(\frac{r_j - r_p}{r_p} \right)^2 + \left(\frac{r_j}{r_p} \right) \right], \quad (4.2)$$

avec C_i le coût du chemin entre le nœud maître et le nœud i , h le nombre de sauts requis, r_j la distance entre le nœud i et le j^{eme} nœud et r_p la longueur du chemin recherchée (exprimé en nombre de sauts). Le premier terme correspond à la pénalité associée à la variance entre r_j et r_p , le second correspond à la pénalité associée à la distance supplémentaire de r_j par rapport à r_p .

Ashish et Stojanovic [PS13] proposent un protocole distribué de découverte des nœuds qui a pour objectif de découvrir la topologie globale du réseau. Le protocole s'appuie sur la construction d'un arbre de diffusion entre les nœuds qui minimise les portées de communication afin de limiter la consommation énergétique des nœuds. Le protocole procède par cycles. Un nœud leader est d'abord élu (adresse la plus petite ou manuellement) puis il initie le processus de découverte. Il diffuse un message avec une puissance d'émission la plus faible possible (P_{min}) et attend de recevoir des réponses. Lorsqu'un nœud reçoit un message, il lui répond en accédant au média via la méthode ALOHA. Le nœud leader met alors sa table de routage à jour et transmet un jeton au nœud voisin lui ayant répondu et qui contient la topologie du réseau découverte. Lorsque ce nœud reçoit le jeton il devient leader, tandis que le précédent nœud leader perd sa qualité de leader. Si un nœud leader ne reçoit pas de message il renvoie un message de découverte avec une puissance d'émission supérieure jusqu'à l'obtention d'une réponse d'un nœud. Ce processus est répété pour chaque tentative infructueuse. Lorsque tous les nœuds ont été leader, le jeton est transmis selon l'arbre de diffusion afin de détecter l'apparition de nouveaux nœuds. Les algorithmes des nœuds leader et par un nœud esclave sont schématisés dans l'annexe A.

4.3.2 Méthodes basées sur une approche opportuniste

Nous appelons une technique opportuniste, si le processus de découverte de voisinage peut être initié par un nœud quelconque du réseau. Othman et al. [OAT06] proposent un protocole où les nœuds échangent leurs localisations afin que chacun construise une vision locale de son voisinage. Carlson et al. [CBA07] ont développé le protocole de routage Location Aware Source Routing (LASR). LASR étend le protocole Dynamic Source Routing (DSR) en prenant en compte la localisation des nœuds et évalue la qualité des liens avec l'estimateur ETX. Les auteurs proposent

une modification de ETX afin de concevoir un estimateur de qualité de lien qui se base sur le Frame Error Rate (FER) :

$$ETX = \frac{1}{(1 - FER)^2}. \quad (4.3)$$

L'estimateur ETX nécessite l'utilisation de messages de découvertes de liens envoyés périodiquement. Toutefois, les auteurs supposent que la forte dynamique de la topologie ne permet pas de mesurer avec précision le FER. Le protocole utilise un modèle de propagation et calcule le FER en fonction de la distance entre les nœuds.

4.3.3 Discussion

Les techniques de découverte de voisinage dans les réseaux acoustiques sous-marins peuvent être classées en deux catégories. La première regroupe les techniques centralisées qui sont plus adaptées pour les réseaux statiques puisqu'un seul nœud initie le processus de découverte. La seconde regroupe les techniques opportunistes où chaque nœud peut initier le processus de découverte et se présentent donc comme plus adaptées pour les réseaux mobiles. Les auteurs des techniques développées supposent que les nœuds possèdent une information de localisation de même nature, telle que les coordonnées ou encore la profondeur des nœuds. Cette hypothèse ne peut être garantie lorsque différents engins évoluent au sein d'un même réseau. Il est donc indispensable dans un tel réseau d'utiliser une information indépendante de la localisation afin de garantir l'utilisation d'une information homogène par tous les nœuds.

4.4 Protocoles de routage pour les réseaux terrestres

Les protocoles de routage ont pour objectif de fournir un service d'acheminement des données entre les nœuds. Ils doivent être efficaces malgré la présence potentielle de contraintes telles qu'une bande passante réduite, la variation des délais de transmission, la présence d'un taux d'erreur important ou encore le changement de topologie d'un réseau. Dans cette section nous décrivons les protocoles dédiés aux MANETs et aux réseaux DTN.

4.4.1 Protocoles pour les MANETs

Dans la littérature, trois types de protocoles sont à distinguer : proactifs, réactifs et hybrides.

Protocoles proactifs

Ces protocoles ont la particularité d'échanger périodiquement des paquets de contrôle afin que chaque nœud puisse construire de façon distribuée une vision de la topologie du réseau. L'envoi régulier de paquets de contrôle permet à un nœud de mettre à jour périodiquement sa table de routage. La transmission périodique des paquets ainsi que le traitement de ces derniers constituent l'inconvénient majeur de ces protocoles.

Optimized Link State Routing (OLSR) est un protocole proactif standardisé par la RFC 3626 [CJ03]. Il repose sur le concept de MultiPoint Relays (MPR) qui permet de minimiser l'inondation du réseau par des messages de contrôle. Chaque nœud transmet périodiquement un paquet de type "HELLO" afin d'être découvert uniquement par son voisinage. Chaque nœud élit parmi son voisinage, un nœud MPR qui a pour charge de relayer les informations qu'il transmettra. Les nœuds MPR ont également la charge de diffuser dans tout le réseau des paquets contenant leur topologie locale. Enfin, un nœud est élu MPR, si parmi son voisinage à deux sauts il possède le plus de voisins. La figure 4.4 illustre le principe de diffusion par inondation et de diffusion avec OLSR.

Fisheye State Routing (FSR) [PGC00] est un protocole à état de lien qui s'inspire du mécanisme d'*œil de poisson* (*fisheye*) pour réduire la fréquence d'envoi des paquets de contrôle. La technique de l'œil de poisson a été développé par Kleinrock et Stevens [KS71] pour le domaine de l'imagerie. Elle consiste à réduire le nombre de détails au fur et à mesure que l'on s'éloigne du pixel se

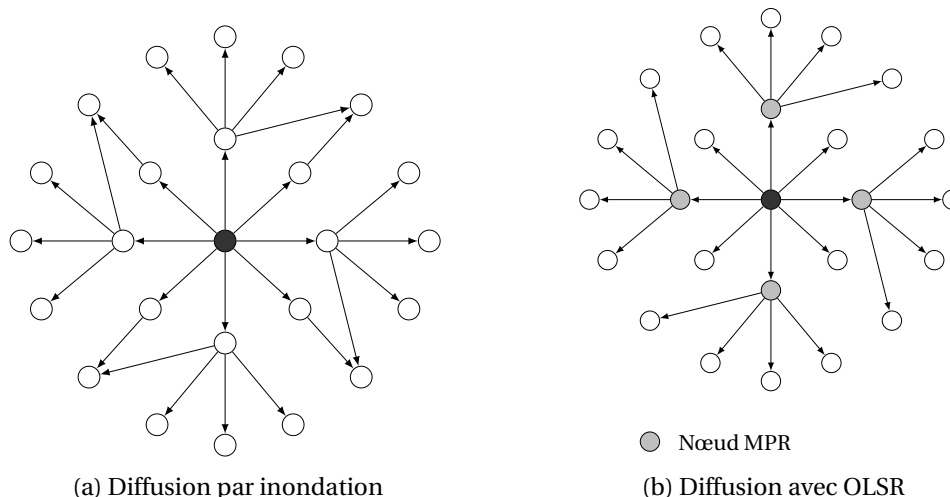


FIGURE 4.4 – Principe de diffusion des messages avec OLSR

trouvant dans le point de focalisation. Le protocole FSR utilise cette technique sur la fréquence d'envoi des paquets de contrôle afin de réduire l'inondation du réseau. Chaque nœud stocke dans sa table de routage les informations reçues par ses voisins et échange périodiquement les siennes avec son voisinage direct. Le mécanisme *œil de poisson* permet à un nœud de diffuser avec une fréquence différente chacun des nœuds découverts en fonction du nombre de sauts que doit effectuer un paquet. Cette stratégie permet d'acheminer un paquet même si un nœud est très éloigné de la destination, puisque qu'à chaque transmission du paquet, les informations de routage deviennent plus précises au fur et à mesure que le paquet s'approche de la destination.

Il existe d'autres protocoles comme Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRF) [OTL04] ou encore Landmark Ad Hoc Routing (LANMAR) [GMP03]. Les protocoles proactifs sont caractérisés par la diffusion périodique de paquets de contrôle ce qui engendre un trafic supplémentaire que doit supporter le réseau. Afin d'éviter de congestionner le réseau, les protocoles limitent la portée de diffusion ou la fréquence d'envoi des messages. L'avantage fourni par ces protocoles est que le processus de découverte des routes est initié dès son déploiement, contrairement aux protocoles réactifs qui l'initient lors de la demande d'envoi de données.

Protocoles réactifs

Les protocoles réactifs ont la particularité de ne pas calculer d'information sur la topologie du réseau avant que celle-ci ne soit nécessaire pour la transmission d'un paquet. Ces protocoles établissent donc les routes "à la demande". La phase de découverte des routes est déclenchée dès lors qu'un paquet nécessite d'être transmis à la destination visée. Le paquet à transmettre est alors stocké dans une file d'attente jusqu'à ce que la route soit déterminée. Ces protocoles possèdent également un mécanisme de maintien de route afin de détecter les changements topologiques et éventuellement de rétablir un lien rompu.

Ad hoc on-demand distance vector (AODV) est un protocole réactif standardisé par la RFC 3561 [PBRD03]. Lorsqu'un nœud reçoit de la part de l'application une demande de transmission, il cherche dans sa table de routage si un chemin est disponible. S'il ne possède pas cette information il initie alors le processus de découverte de route en diffusant une demande de route (route request). Les nœuds recevant ce paquet diffusent ce message jusqu'à ce qu'il atteigne la destination ou un nœud ayant déjà connaissance d'une route. Une réponse indiquant la présence d'une route est alors renvoyée empruntant le chemin inverse du message de demande de route. La validité de la route expire lorsqu'il n'y a plus de données à envoyer ou au bout d'un délai fixé. Le nœud initiateur de la demande de route maintient un minuteur afin de répéter sa requête (en nombre limité) si une réponse n'est pas réceptionnée durant le temps imparti. Le protocole peut implémenter un mécanisme de découverte de voisinage proche qui permet de vérifier périodiquement

la présence de liens. Enfin, lorsqu'un lien d'une route est rompu, un message d'erreur est envoyé à la source pour réinitialiser le processus de découverte. La figure 4.5 présente un exemple de sélection de route avec AODV.

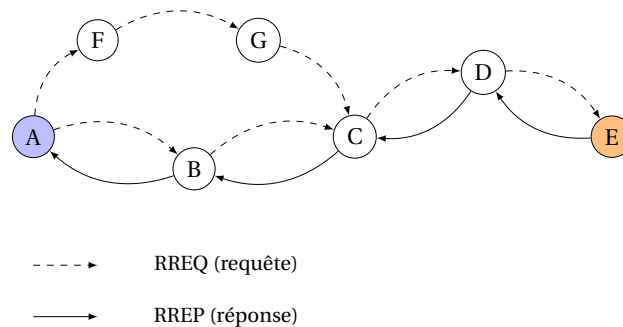


FIGURE 4.5 – Détection et sélection de la route la plus courte entre le nœud A et le nœud C

DSR [JHM07] est un protocole réactif qui permet de faire un routage à la source. Autrement dit, chaque paquet contient dans son en-tête (e.g. option dans l'entête IP) la liste complète des nœuds à traverser pour atteindre la destination. Lorsqu'un nœud reçoit de la part de l'application une demande de transmission d'un paquet, il stocke celui-ci dans une file d'attente et cherche si une route est disponible. Si le nœud n'en possède pas, il initie une phase de découverte et diffuse un paquet de demande de route à l'ensemble de ses voisins. Ce paquet contient les adresses des nœuds qui ont transféré ce message jusqu'à atteindre le nœud destination ou bien un nœud possédant une route valide vers la destination. Une phase de découverte de route est alors déclenchée et un second paquet de demande de route est déclenché. Afin d'éviter un bouclage infini des processus de recherche de route, le second paquet contient le chemin découvert par le paquet précédent afin que le nœud source (celui qui a initié la phase de découverte précédente) puisse connaître la route valide.

Les protocoles réactifs ont pour avantage de réduire le nombre de messages de routage, puisqu'ils ne sont transmis que lors d'une phase de recherche d'une route. Toutefois, il est indispensable que les nœuds implémentent un mécanisme de gestion de files d'attente afin de stocker les paquets à transmettre durant le temps de découverte d'une route. Cette phase introduit donc un délai d'acheminement supplémentaire comparé aux protocoles proactifs.

Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les approches proactives et réactives. Ils reposent généralement sur une architecture hiérarchique où les deux approches sont utilisées à des niveaux différents. Pour cela, les protocoles définissent des zones au sein desquelles une approche de routage proactive est utilisée. Les routes entre des nœuds appartenant à des zones distinctes sont quant à elles obtenues via une approche réactive.

Zone Routing Protocol (ZRP) [Haaul] est un protocole hybride où chaque nœud définit une zone incluant tous ses voisins se trouvant à une certaine distance. Les nœuds qui se trouvent à la distance limite de la zone sont appelés nœuds périphériques. Le protocole ZRP utilise une technique proactive appelée IntrAZone Routing Protocol (IARP) à l'intérieur d'une zone, et réactive appelée Interzone Routing Protocol (IERP) lorsque le destinataire se situe hors de la zone. Lorsque à la demande de l'application un nœud doit transmettre des données, il vérifie dans sa table de routage s'il ne possède pas une route actuellement valide. Si la destination se trouve dans la même zone du nœud transmetteur, cette information est obtenue par le protocole IARP. Si la destination se situe dans une zone différente, le nœud transmetteur initie une recherche de route (avec le protocole IERP) et transmet sa requête à tous les nœuds périphériques de la zone. Si l'un d'entre eux connaît préalablement une route, il renvoie une réponse, sinon le protocole poursuit récursivement la recherche. La figure 4.6 illustre le principe de zones avec ZRP.

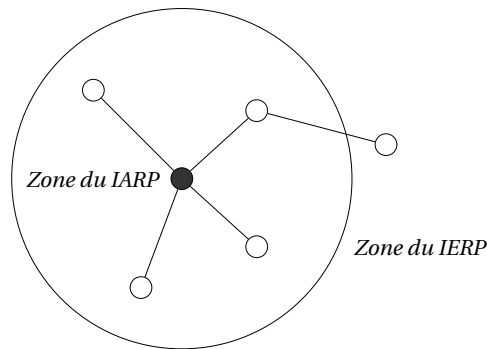


FIGURE 4.6 – Exemple d’une zone définie par le nœud central avec ZRP

Le protocole Cluster Based Routing Protocol (CBRP) [JLT99] utilise un mécanisme de routage hiérarchique où les nœuds sont regroupés à l’intérieur de clusters. Chaque cluster est composé d’un leader ainsi que d’un ensemble de nœuds, tous des voisins directs. Le routage à l’intérieur des clusters se fait via un protocole proactif, tandis que les communications interzones sont effectuées par un routage réactif. CBRP utilise un routage à la source où chaque paquet de données contient dans son en-tête la liste complète des nœuds à traverser pour atteindre la destination.

Les protocoles hybrides ont pour ambition de tirer profit des avantages des protocoles proactifs et réactifs, mais ils héritent également des inconvénients de chacun. Ils offrent toutefois un bon compromis entre les bénéfices et inconvénients apportés par les protocoles proactifs et réactifs. On peut remarquer que les protocoles hybrides intègrent généralement la notion de groupe afin de délimiter la portée des protocoles réactifs et proactifs.

Classification annexe

Il existe d’autres classifications qui permettent de différencier les protocoles, par exemple selon la structure du réseau. On distinguera alors les protocoles hiérarchiques (i), où certains nœuds sont élus et assument des fonctions de routage particulières au sein d’une zone ou d’un cluster. Dans les protocoles basés sur des zones chaque nœud possède sa propre zone et définit des stratégies différentes pour communiquer à l’intérieur et à l’extérieur de cette zone. Les protocoles basés sur des clusters utilisent des algorithmes de formation de clusters regroupant plusieurs nœuds gérés par un leader qui régit l’adhésion d’un nœud au cluster ainsi que des fonctions de routage. Enfin, les protocoles basés sur un cœur de réseau sélectionnent des nœuds qui vont composer un backbone et qui sont responsables des tâches spéciales comme la diffusion des messages de routage. Une deuxième catégorie (ii) regroupe les protocoles qui utilisent des informations de positionnement géographiques comme les données GPS. Ils permettent de déterminer par exemple le voisin le plus proche de la destination finale ou encore de choisir le voisin qui permet de progresser le plus en direction du destinataire. Enfin la dernière catégorie (iii) regroupe les protocoles de routage uniformes, également appelés protocoles de routage à plat où tous les nœuds possèdent le même rôle dans le processus de routage.

Analyse des performances

Chanet [Cha07] soutient que les protocoles proactifs possèdent une bonne réactivité car les routes sont déterminées dès le lancement du protocole. Cependant, cette réactivité est au prix d’un overhead important due à l’échange périodique de messages de routage limitant la bande passante disponible pour les données. Ces protocoles apparaissent comme adaptés aux réseaux de taille moyenne dont les nœuds peuvent avoir une forte mobilité. En parallèle, les protocoles réactifs souffrent d’un temps de latence significatif puisqu’une route est seulement découverte lorsque des données doivent être envoyées. Ils présentent toutefois l’avantage de consommer moins de bande passante que les protocoles proactifs. Ce type de protocole est donc adapté aux

réseaux de grandes tailles dans lesquels les nœuds ont une mobilité réduite. Les protocoles hybrides tentent de tirer profit des avantages des approches proactives et réactives. Cependant, le routage est plus complexe puisqu'un mécanisme de zone ou de cluster doit être introduit pour définir le type de protocole utilisé. Malgré cela, cette approche offre un compromis qui peut être intéressant entre les avantages/inconvénients offerts par les deux approches.

Bai et al [BSH03] évaluent l'impact de quatre modèles de mobilité (Random Waypoint, Reference Point Group, Freeway et Manhattan) sur deux protocoles réactifs (AODV, DSR) et un protocole proactif (DSDV). Les auteurs montrent que le protocole DSR offre de manière générale le meilleur débit excepté pour le modèle Manhattan où le protocole AODV est le meilleur. Le protocole DSDV possède de meilleures performances en terme de débit lorsque les nœuds sont regroupés (modèle Reference Point Group) où possèdent une faible mobilité. Les protocoles réactifs supportent mieux l'augmentation de la vitesse des nœuds et ce quelque soit le modèle de mobilité utilisé. Concernant le ratio entre le taux de messages de routage transmis et le taux de données envoyées (overhead), ceux des protocoles réactifs sont inférieurs aux protocoles proactifs, toutefois l'augmentation de la vitesse des nœuds contribue à accroître ce taux. Ce comportement peut être expliqué par le nombre de routes invalides stockées en cache par le protocole lors de précédentes découvertes.

Maan et Mazhar [MM11] évaluent la performance des protocoles proactifs (OLSR, DSDV) et réactifs (AODV, DSR, DYMO) à travers trois modèles de mobilité (Column mobility, Reference Point Group et Random Waypoint). Ils s'intéressent au taux de paquets délivrés, au délai moyen d'acheminement ainsi qu'au ratio entre le nombre de paquets de contrôle et le nombre de paquets de données. Ils observent la forte influence des modèles de mobilité ainsi que la densité du réseau sur la performance des protocoles de routage. Le protocole AODV semble être celui-ci qui offre le plus souvent les meilleures performances. Toutefois les auteurs ne détaillent pas le modèle de propagation utilisé ce qui nous conduit à utiliser les résultats avec parcimonie.

Chin et al. [CJWK02] partagent leur expérience sur l'implémentation des protocoles de routage et identifient le problème des algorithmes de sélection du voisinage basés sur le nombre de sauts. L'utilisation d'une telle métrique ne permet pas de déterminer précisément l'état du lien et donc celui de la route. Ils observent également que les paramètres des protocoles tels que la valeur des temporisateurs ne peuvent être fixés d'une manière efficace dans un environnement mobile. Le changement de route suite à un évènement (par exemple une rupture de lien) constitue lui aussi un problème car si la route est invalide mais que cet état n'est encore détecté par le protocole, alors les paquets seront perdus. Il convient donc de rendre le protocole préemptif afin qu'il détecte toute dégradation d'un lien pour anticiper et choisir une route plus stable.

4.4.2 Protocole de routage DTN

L'utilisation des protocoles de routage MANET ne peut se faire que dans les réseaux qui possèdent une forte connectivité. Cette propriété ne peut pas toujours être respectée lorsque la densité des nœuds est faible ou lorsque la vélocité des nœuds est importante. L'approche des protocoles de routage DTN consiste à pouvoir acheminer des données dans un réseau même s'il y a des déconnexions entre les nœuds durant des intervalles de temps importants. La figure 4.7 illustre la différence entre le routage de type MANET (classique), et DTN, en montrant les différentes phases de transmission d'un message M entre les nœuds A et C.

Les techniques de routage DTN ont fait l'objet de nombreuses études et peuvent être classées de différentes manières, avec ou sans infrastructure [PPC06], stochastiques ou déterministes [Zha06]. Cao et Sun [CS13] présentent une classification étendue en se basant sur [PPC06] [Zha06] et regroupent les protocoles de routage en trois catégories : (i) basés sur la dissémination d'information, (ii) basés sur un contexte, (iii) hybride basés sur les deux catégories précédentes.

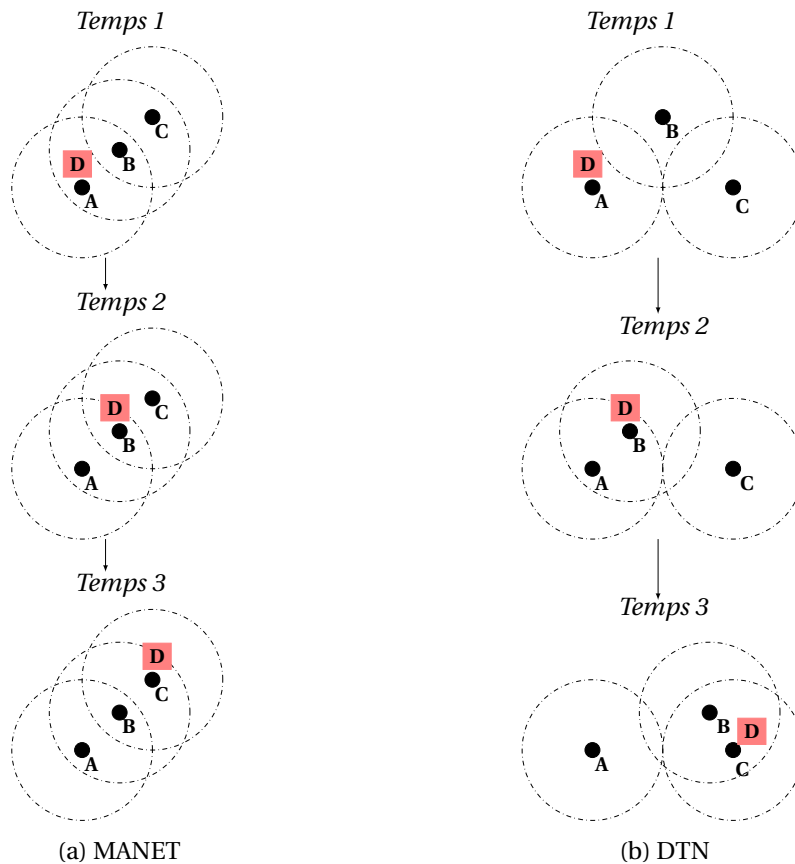


FIGURE 4.7 – Routage dans les réseaux MANETs et DTNs

Basés sur la dissémination

Les techniques de dissémination reposent sur la répllication des messages. La technique de routage épidémique [VB00] consiste à répliquer le message lorsque le nœud porteur du message rencontre un nœud n'ayant aucune copie de ce message. La répllication des paquets permet de réduire le délai d'acheminement par rapport à une méthode de livraison directe. Cette solution s'avère néanmoins très consommatrice en terme de mémoire. La méthode Two-Hop-Relay [GT02] consiste à limiter le nombre de répllications du message : le nœud source diffuse une copie de son message à n nœuds qui ont la charge de transmettre ce message à destination. Dans la méthode Spray-and-Wait [SPR08b] le nœud source initie dans un premier temps un nombre limité de répliques du message. Tant que le nombre de copies possibles est supérieur à un, le nœud porteur du message peut transmettre une copie à un nœud voisin. Les nœuds porteurs du message attendent ensuite de rencontrer le nœud destinataire pour transmettre le message. Une autre méthode consiste à utiliser en complément des méthodes précédentes des techniques de codage. Wang et al. [WJMF05] combinent la technique de dissémination Two-Hop-Relay avec une méthode de codage. Dans [LLL07] les auteurs combinent l'utilisation du "network coding" [ACLY00] et d'un routage de type épidémique afin de réduire le nombre de messages de routage.

Basés sur un contexte

Les techniques basées sur le contexte utilisent une métrique afin de déterminer le meilleur nœud relai. Une première méthode consiste à prédire le prochain nœud rencontré. Le protocole First Contact [JFP04] permet à un nœud de transmettre un paquet au premier rencontré, de cette façon les nœuds effectuent une recherche aléatoire de la destination cible. Le protocole Seek-and-Focus [SPR08a] se base sur deux phases; une première phase de recherche (seek) où la transmission de messages se fait de manière aléatoire, et une seconde phase (focus) où la transmission se

fait lorsqu'un nœud rencontre un nœud ayant rencontré plus récemment le nœud destinataire.

Une autre méthode consiste à déterminer un chemin afin de livrer les données au plus tôt à la destination cible. Le protocole Delay Tolerant Link State Routing (DTLSR) se base sur une estimation du délai minimal attendu afin de sélectionner le chemin ayant le délai d'acheminement le plus court [DF07]. Le protocole DTN Hierarchical Routing (DHR) [LW09] se base sur la construction d'une hiérarchie afin de minimiser le délai d'acheminement des paquets.

L'important volume de paquets à acheminer peut conduire à surcharger la mémoire de stockage des nœuds du réseau. C'est pourquoi la majorité des protocoles DTN effectuent un contrôle de congestion qui se traduit par l'une des quatre approches proposées dans la littérature. (i) L'arrêt du stockage des messages entrants, (ii) la suppression des messages stockés, (iii) le contrôle du nombre des copies d'un message, (iv) la sélection d'un nœud en fonction de sa charge mémoire actuelle.

La dernière approche s'inspire des réseaux sociaux pour définir des nœuds amis ou étrangers en fonction de leurs intérêts communs. Ainsi un nœud partageant un intérêt avec un voisin diffusera ses messages. Ce concept d'ami est très subjectif, dans [BS10] par exemple les auteurs proposent le concept de Social Pressure Metric (SPM) qui utilise le temps de coupure entre les nœuds et leur futur moment de rencontre. Le protocole Social Selfish Aware Routing (SSAR) [LZC10] définit un indice d'égoïsme pour chaque nœud, lequel est utilisé pour définir la politique de routage des nœuds.

Méthodes hybrides

Les méthodes dites hybrides combinent les approches de réplication et de contexte. Le protocole PROPHET [LDS03] se base sur une métrique prenant en compte la probabilité de rencontre. Par exemple, si un nœud A rencontre le nœud B plus rarement que le nœud C avec B tel que $P(A,B) < P(C,B)$. Alors si le nœud A possède un paquet pour B et qu'il rencontre le nœud C, A lui transmettra le paquet. Le protocole permet donc de disséminer une information en fonction de la probabilité de rencontre entre les nœuds. Une version étendue du protocole Spray-and-Wait appelé MAKing pRogress Towards delivery (SMART) [LQJ⁺07] introduit la notion de nœuds compagnons, qui pour un nœud A donné, sont les nœuds les plus fréquemment rencontrés par A. Lorsqu'un nœud veut transmettre des paquets à une destination, il envoie une copie de ces données aux nœuds compagnons de la destination. Puis les nœuds attendent de rencontrer le destinataire final pour lui transmettre leurs données. Le protocole Adaptive Multi-copy Routing (AMR) est également basé sur une approche Spray-and-wait et contrôle le processus de dissémination en fonction du délai d'acheminement. Lorsqu'un nœud possède un paquet à transmettre à une destination et rencontre un nœud (qui n'est pas le destinataire), il compare son délai d'acheminement estimé et celui proposé par le nœud rencontré. Si le délai estimé par le nœud rencontré est inférieur alors une copie lui est transmise.

Analyse des performances

Almeida et al. [DDAOMN12] comparent les protocoles de routage pour les MANETs et les réseaux DTN. Leur évaluation montre que les protocoles DTN ont de meilleures performances en terme de taux d'acheminement et de consommation énergétique lorsque la densité des nœuds est faible. En effet, si un chemin vers une destination n'est pas disponible, les protocoles MANET déclarent la route inexistante et tous les paquets destinés au destinataire sont supprimés.

Lorsque la densité des nœuds augmente les protocoles MANET présentent de meilleures performances, car les protocoles DTN basés sur des répliques de données ont tendance à générer un trafic important provoquant de nombreuses collisions. Ces collisions ont pour conséquence d'augmenter la consommation énergétique puisque les nœuds retransmettent plusieurs fois leurs données. Par ailleurs, plus le réseau est dense, plus les échanges entre les nœuds augmentent utilisant davantage de mémoire allouée aux files d'attente. Concernant le délai, les protocoles de type MANET sont plus réactifs et permettent d'avoir un meilleur délai de bout en bout.

Les protocoles DTN trouvent leur application lorsque les nœuds se rencontrent de manière intermittente, autrement dit lorsque la densité du réseau est faible. Lorsqu'elle augmente les protocoles de type MANET obtiennent de meilleures performances. Une nouvelle génération de protocoles à politique de routage hybride (MANET/DTN) s'est développée comme le protocole HYMAD ou encore AODV-DTN qui permettent d'adopter une stratégie différente en fonction du contexte. Toutefois, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes supplémentaires qui permettent de changer la politique de routage en fonction du contexte.

4.5 Protocoles de routage dans les réseaux sous-marins

Le média acoustique est considéré comme le support de communication le plus approprié pour les transmissions sous-marines. Nous avons montré dans le chapitre 3 les phénomènes physiques concernant la propagation des signaux acoustiques. Les canaux de communication sont caractérisés par une faible bande passante, un taux d'erreur pouvant être important ainsi que des délais de transmission potentiellement importants. Ces caractéristiques doivent donc être prises en compte par les protocoles de routage afin de ne pas dégrader les performances de communication. Dans cette section, nous menons une investigation sur les protocoles de routage dédiés aux réseaux MANETs et DTNs.

4.5.1 Protocoles pour les MANETS

Une première approche consiste à porter les protocoles de routage classiques dans les réseaux sous-marins. Alawibi [Ald08] étudie la performance des protocoles de routage MANET classiques lorsqu'ils sont utilisés dans un environnement sous-marin et avec des communications acoustiques. Il compare dans son étude trois protocoles : AODV (réactif), DSR (réactif) et DSDV (proactif) avec des nœuds fixes et en utilisant le protocole d'accès CSMA/CA. L'étude porte à la fois sur le débit offert par le protocole, le taux de paquets délivrés, ainsi que le délai d'acheminement moyen. L'auteur montre qu'en terme de débit offert, le protocole AODV est meilleur. Concernant le taux de paquets délivrés, les protocoles DSDV et DSR offrent de meilleures performances lorsque le trafic est faible. Lorsque la charge augmente, AODV redevient le plus adapté mais offrant un taux de paquets reçu de moins de 10%. Concernant le délai moyen, AODV surpasse les autres protocoles en obtenant le plus faible délai d'acheminement ([20s, 35s]). Les travaux de Qaudri et Shah [QS10] tendent à confirmer ces résultats à savoir que AODV et DSDV obtiennent de meilleures performances en termes de taux de paquets délivrés, de délai d'acheminement, de débit par rapport aux protocoles OLSR et DSDV.

La portabilité des protocoles de routage classiques se trouve limitée dans un environnement acoustique sous-marin. Les protocoles proactifs requièrent l'envoi périodique de paquets de contrôle ce qui réduit la bande passante disponible pour les données. Cet envoi périodique peut également être source de nombreuses collisions. Au contraire, les protocoles réactifs ne souffrent pas du problème de l'envoi périodique de paquets de contrôle car une route est découverte à la demande. Néanmoins, ils ajoutent un délai d'acheminement supplémentaire le temps de la découverte de la route. Les protocoles réactifs utilisent également mais de manière locale un mécanisme de découverte de voisinage proche afin de tester la validité d'un lien. Il est donc clair que le portage des protocoles conçus pour les MANETs ne peut apporter une solution viable pour router les données en milieu sous-marins. Il est donc nécessaire d'adapter les techniques de routages aux propriétés spécifiques des communications acoustiques dans ce milieu.

Protocoles de routage spécifiques

Les protocoles de routage dans les réseaux sous-marins actuels sont conçus pour les réseaux de capteurs. Ils se distinguent des réseaux de capteurs terrestres par le fait qu'ils peuvent communiquer sur de longues distances et ainsi couvrir de larges zones. Les nœuds peuvent se déplacer en suivant les courants marins. La bande passante dans les réseaux acoustiques sous-marins

est beaucoup plus faible que dans les réseaux terrestres. Enfin la consommation énergétique des nœuds est un aspect encore plus important car la consommation des modems acoustiques est largement supérieure aux interfaces de type Wi-Fi².

Les protocoles de routage pour les réseaux sous-marins peuvent être classés selon divers critères comme le montre Ayaz et al. [ABAF11]. Une classification pertinente consiste à classer les protocoles selon leur profil : gestion de la mobilité, efficacité énergétique, routage fiable, taux de paquets délivrés. Cette classification illustrée dans la figure 4.8 constitue l'axe de présentation de cette section.

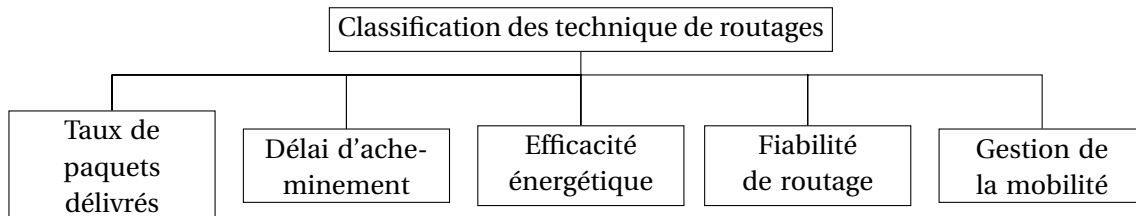


FIGURE 4.8 – Schéma de la classification des protocoles de routages acoustique sous-marins

Nous présentons dans un premier temps les protocoles les plus efficaces en matière de taux de paquets délivrés. Zheng et al. [GCW⁺08] proposent un protocole DTN où les décisions de routage prennent en compte les caractéristiques du réseau et les paquets à transmettre. Pour cela une priorité de transmission des paquets est calculée à partir d'un niveau de priorité de transmission, de l'âge du paquet, de la densité du voisinage et du niveau de batterie du nœud. L'existence de plusieurs chemins vers une destination peut être exploitée afin d'améliorer le taux de paquets délivrés. Peng et al. [SSL07] exploitent la présence de chemins disjoints afin de créer des copies du paquet afin que chacune d'entre elle parcoure un chemin. Seah et Tan [ST06] proposent un protocole basé sur un découpage du réseau en clusters, où un nœud peut communiquer avec tous les nœuds tête du cluster afin d'exploiter la présence de multi-chemins. La figure 4.9 montre un exemple de topologie formée par le protocole de Seah et Tan [ST06].

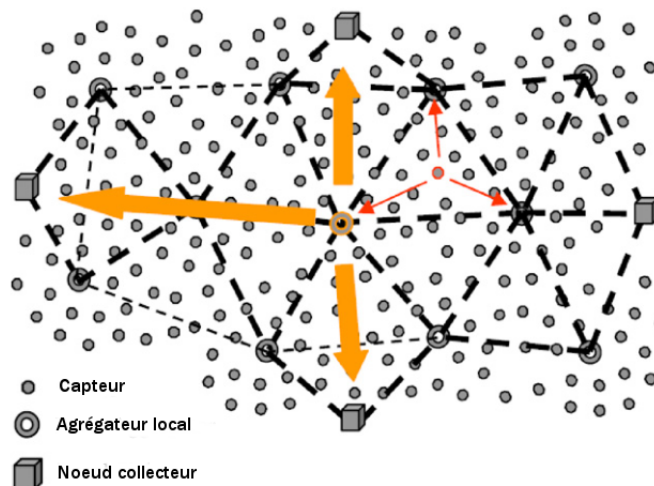


FIGURE 4.9 – Topologie du réseau acoustique sous-marin formée par le protocole de Seah et Tan [ST06]

Les protocoles que nous décrivons maintenant ont pour objectif de réduire le délai d'acheminement. Le protocole Information-Carrying Routing Protocol (ICRP) [LYL⁺07] agrège les données de routage avec les données utiles. Lorsqu'une route est inconnue, le nœud émetteur diffuse les données à envoyer qui contiennent aussi les données de routage utilisées pour découvrir la route. Lorsque le destinataire reçoit le paquet, il renvoie un acquittement afin de faire connaître au nœud source la bonne réception des données ainsi que le chemin utilisé. D'autres protocoles se basent

2. Cette différence de consommation est montrée dans le chapitre 6.

sur des informations de localisation afin d'acheminer plus rapidement les données à destination. Le protocole Focused Beam Routing (FBR) [JSZ08] par exemple utilise les informations de localisation afin de transmettre une information de proche en proche entre deux nœuds non adjacents.

Des protocoles furent développés pour optimiser la consommation énergétique des nœuds. Delay-tolerant Data Dolphin (DDD) [MKL⁺07] est un protocole de type DTN qui utilise des nœuds mobiles afin de collecter les données émises par des capteurs statiques. Cette technique permet de réduire le nombre de transmissions puisque seuls les nœuds collecteurs font office de relais, ce qui contribue à réduire la consommation énergétique. Le protocole Energy-Efficient Routing Protocol (EUROP) [NA08] se base sur la pression pour déterminer la profondeur des nœuds. Chaque nœud connaît la profondeur où il se situe grâce à un capteur de pression. Lorsqu'un nœud veut communiquer il initie une demande de route et détermine quel nœud est le plus proche de la destination en fonction de sa profondeur.

Les protocoles que nous décrivons ont pour objectif d'améliorer la fiabilité de l'acheminement des données. Le protocole Directional Flooding-Based Routing (DFR) [HK08] repose sur une technique de diffusion contrôlée en fonction de la localisation des nœuds afin de limiter le nombre de messages de contrôle. Certains travaux étendent des protocoles existant, comme les travaux de Nicolou et al. [NSX⁺07] qui améliorent le protocole Vector Based Forwarding (VBF) en proposant une extension du protocole Hop-by-Hop Vector Based Forwarding (HH-VBF).

Des protocoles de routage ont également été développés pour gérer la mobilité des capteurs sous-marins. Le protocole VBF [XCL06] utilise des informations de localisation pour acheminer les paquets. Ce protocole suppose que tous les nœuds connaissent leur position et que chaque paquet échangé contienne la position des nœuds impliqués dans sa transmission. A partir de ces informations, un chemin virtuel est défini entre la source et le destinataire et seuls les nœuds les plus proches de ce chemin virtuel peuvent retransmettre le paquet. Le protocole LASR [CBA06] est une modification du protocole DSR et s'appuie sur une métrique de qualité de lien (version modifiée de la métrique ETX) ainsi que sur la localisation des nœuds. Le protocole estime la topologie locale associée à un nœud à partir des transmissions entrantes. Toutefois, le protocole étant basé sur DSR les paquets contiennent la liste des nœuds transmettant le paquet jusqu'à destination.

Discussion

L'utilisation des protocoles classiques dans les milieux sous-marins ne se présente pas comme une solution viable. Pour répondre à ce problème, de nombreux protocoles ont été développés chacun optimisant une caractéristique de routage telle que la consommation énergétique, la fiabilité d'acheminement des données ou encore la réduction des délais de transmission de bout en bout. De manière générale ces protocoles s'appuient sur des architectures particulières comme le protocole DDD ou la connaissance de la localisation des nœuds dans le but d'acheminer au mieux les données. Cela implique donc que tous les nœuds possèdent le même type d'information de localisation ce qui est improbable lorsque plusieurs systèmes distincts évoluent dans le même environnement. Il est donc impératif d'homogénéiser les informations de localisation ou bien d'utiliser uniquement des informations sur la topologie du réseau.

4.5.2 Protocoles de routages DTN sous-marins

Les protocoles de routage DTN sous-marin répondent à la même problématique que les protocoles DTN terrestres. Comme pour les protocoles précédents, la majorité des protocoles DTNs ont été conçus pour les réseaux de capteurs. Bien que les capteurs possèdent une faible mobilité, il se peut qu'ils soient déployés de manière éparse engendrant de fortes déconnexions dans le réseau. Il est donc impératif d'utiliser une technique de routage de type DTN. Ces protocoles peuvent être classés selon leur approche concernant le contact entre les nœuds : (i) la première regroupe les protocoles se basant sur une rencontre programmée des nœuds, (ii) la seconde sur une rencontre non programmée des nœuds. Cette deuxième catégorie peut être scindée en deux sous-catégories comprenant les approches opportunistes et les approches de prédiction de contact [CCSC14].

Protocoles basés sur des rencontres programmées entre les nœuds

Les protocoles se basant sur une rencontre programmée des nœuds, supposent que les mouvements des nœuds sont synchrones. De manière générale ces protocoles sont basés sur une architecture centralisée. Le protocole Depth Based Routing (DBR) [YSC08] propose un mécanisme de routage basé sur une architecture centralisée autour de nœuds en surface qui collectent les données. Chaque nœud connaît son niveau de profondeur et retransmet un message reçu si et seulement si sa profondeur est inférieure à celle du nœud précédent, et ce jusqu'à ce que l'information soit réceptionnée par un nœud collecteur. La figure 4.10 montre l'architecture utilisée par le protocole DBR.

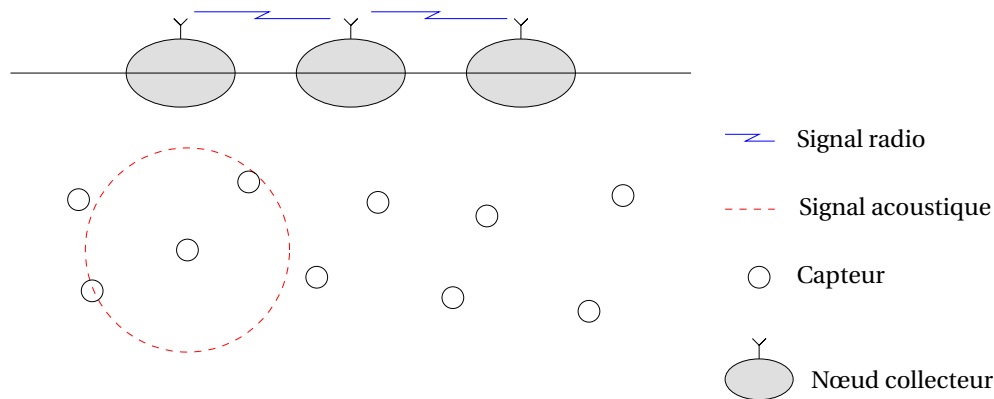


FIGURE 4.10 – Architecture utilisée par le protocole DBR

Song et al. [ZLC13] proposent un protocole de routage et une méthode de découverte de l'état des liens afin de déterminer les liens bidirectionnels et unidirectionnels. Les auteurs argumentent que l'état des liens et notamment la présence de liens asymétriques est due au faisceau acoustique qui ne se propage pas de manière totalement omnidirectionnelle conduisant de nombreux liens entre les nœuds à être asymétriques. Afin de détecter ce type de lien un message de contrôle est diffusé. Celui-ci stocke les adresses des nœuds qui l'ont retransmis jusqu'à arriver au nœud destination. Le message est alors renvoyé, si les liens qui composent le chemin sont symétriques alors le message de retour suivra le même chemin. Dans le cas contraire, le message empruntera un chemin différent.

Protocoles basés sur des rencontres non programmées entre les nœuds

Les protocoles supposant une rencontre non programmée des nœuds peuvent adopter des approches opportunistes ou bien prédire les occurrences de rencontre afin d'élire le meilleur voisin pour transmettre les données à la destination. Nous présentons ces protocoles selon deux catégories : (i) les protocoles opportunistes et (ii) les protocoles prédictifs.

Tiansi Hu et al. [HF10] proposent un protocole de routage utilisant la technique d'apprentissage par renforcement pour permettre au protocole de choisir le meilleur voisin pour transmettre les données à destination. Le protocole repose sur une technique d'apprentissage par renforcement (Q-learning) afin de déterminer la meilleure action (transmettre ou garder le paquet) à effectuer lorsque deux nœuds se rencontrent. Zheng et al. [GCW⁺08] proposent un protocole permettant d'avoir un compromis entre les performances de routage et surcharge générée par le protocole due la réplication de messages. Pour cela le protocole gère dynamiquement le nombre de copies d'un message contrairement aux approches Spray-and Wait qui utilisent un nombre prédéterminé. Une copie d'un message est transmis par un nœud lorsqu'un délai d'attente a été dépassé. Lorsqu'un message est transmis au nœud destinataire, un acquittement est alors automatiquement délivré.

Le protocole Sector-based routing with destination location prediction (SBR-DLP) [CSC09] observe la tendance de mobilité des engins aquatiques dans le but de prévoir leurs mouvements.

Lorsqu'un nœud veut envoyer un message à une destination, il envoie un paquet d'annonce incluant sa position et celle de la destination. Lorsqu'un nœud écoute ce type de paquet il détermine si sa position est inférieure à la distance entre l'émetteur et la destination (localisation prédite). Si les conditions sont satisfaites alors le nœud envoie une réponse à l'émetteur, indiquant sa position. Cette information est alors utilisée par le nœud pour déterminer quel voisin est le plus proche de la destination. Tiansi Hu et al. [HF13] développent une évolution du protocole QELAR [HF10] en ajoutant un système prédictif de rencontre. Le protocole de base toujours sur l'algorithme Q-learning afin de déterminer la politique de transmission d'un message. Contrairement à l'approche proposée dans [HF10], les auteurs utilisent un filtre de type Least Mean Squares (LMS) afin de maintenir une fenêtre de prédiction de contact.

Conclusion

Les protocoles de routage DTN dans les réseaux acoustiques sous-marins peuvent être classés en trois catégories : ceux supposant que les occurrences de contact entre les nœuds sont programmées, ceux utilisant une approche opportuniste et ceux prédisant le contact entre les nœuds. Contrairement aux protocoles de routage terrestres, la majorité des protocoles sous-marins sont utilisés pour les réseaux de capteurs. La question du changement de politique de routage (MANET/DTN) n'est donc pas étudiée car la répartition éparse des nœuds, leur faible mobilité et l'importante portée des communications permettent de considérer les protocoles DTNs comme suffisants.

4.6 Modèles associés

Les réseaux ad-hoc sont caractérisés par une topologie changeante au cours du temps. Cette dynamique provoque des déconnexions qui peuvent survenir de manière imprévisible. Seules alors les communications avec les voisins directs doivent être mises en œuvre par les algorithmes distribués. L'utilisation de modèles de calculs locaux permet de décrire des algorithmes distribués où l'état d'un processus est modifié en fonction de son état précédent et des états des processus avec lesquels il est en relation. Ces modèles fournissent un moyen simple de description tout en étant indépendants du modèle de communication utilisé (i.e. passage de message, mémoire partagée ou encore les communications par registres). Il existe plusieurs formes de calculs locaux comprenant les ré-étiquetages de graphes, les réseaux de Pétri, les automates cellulaires ou encore les agents mobiles. Dans cette thèse l'utilisation du ré-étiquetage de graphes a été retenue car le formalisme utilisé est simple, intuitif et adapté à la représentation d'algorithmes distribués dans un réseau dynamique. L'utilisation du système de ré-étiquetage de graphe dans la suite de ce document servira à la fois à exprimer les algorithmes de manière formelle mais aussi à fournir une représentation graphique de leur comportement.

4.6.1 Modèle GRS

Le modèle de ré-étiquetage a été initialement conçu pour s'appliquer dans les graphes statiques et permet d'exprimer les algorithmes distribués. Le modèle Graph Relabeling System (GRS) [LMS99] [LMS] peut être décrit formellement par la définition suivante : Soit un graphe G tel que $G = (V(E), E(G))$ qui composé d'un ensemble de sommets $V(G)$ et d'un ensemble d'arêtes $E(G)$. Dans un graphe étiqueté $\mathbf{G} = (G, \lambda)$ où λ est la fonction qui associe à chaque sommet de $V(G)$ et à chaque arête de $E(G)$ une étiquette qui code l'état du nœud ou de l'arête correspondante. Chaque étape de calcul consiste en un ré-étiquetage d'un sous graphe de $\mathbf{G}$ selon un modèle de calcul. Il existe quatre modèles de calculs locaux, aussi appelés Local Compute (LC), que nous décrivons ci-dessous.

Dans le modèle LC0 cellulaire, figure 4.11a, le ré-étiquetage se fait uniquement sur le sommet en prenant en compte l'état de son voisin. Dans le modèle LC0 présenté figure 4.11b, le ré-étiquetage s'effectue sur le sommet et un de ses voisins. Dans le modèle LC1, figure 4.11c, le som-

met interagit avec l'ensemble de son voisinage, toutefois seul le sommet modifie son étiquette. La figure 4.11d présente le modèle LC2 où le nœud central interagit également avec l'ensemble de ses voisins. Le ré-étiquetage se fait sur le sommet ainsi que sur l'ensemble des nœuds faisant partie de son voisinage.

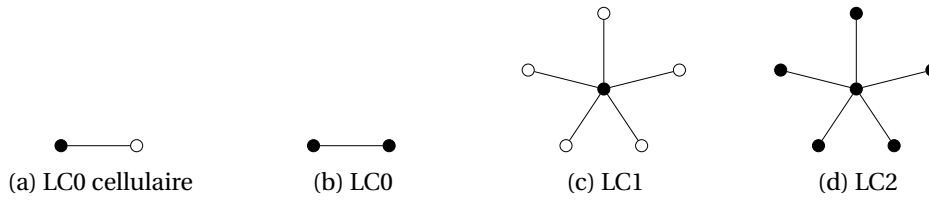


FIGURE 4.11 – Modèles de calculs locaux

Une règle de ré-étiquetage se définit par un couple (précondition, ré-étiquetage) tel que si la précondition est remplie pour un sous-graphe de G alors ce sous-graphe est ré-étiqueté selon la règle spécifiée. Un algorithme est donc représenté par un système de ré-étiquetage composé d'une ou plusieurs règles. En conclusion, la modélisation d'un système complet passe par une affectation des états initiaux ainsi que la définition d'un ensemble de règles de ré-étiquetage.

4.6.2 Modèle DAGRS

Dynamicity Aware Graph Relabeling System (DAGRS) [Cas07] enrichit le modèle GRS en introduisant la dynamique du graphe sous-jacent et la possibilité pour les algorithmes de réagir aux événements. Pour représenter la dynamique du graphe on utilise un formalisme qui consiste à superposer les graphes de communications après chaque événement topologique, on parle alors de graphe évolutif, fig 4.12.

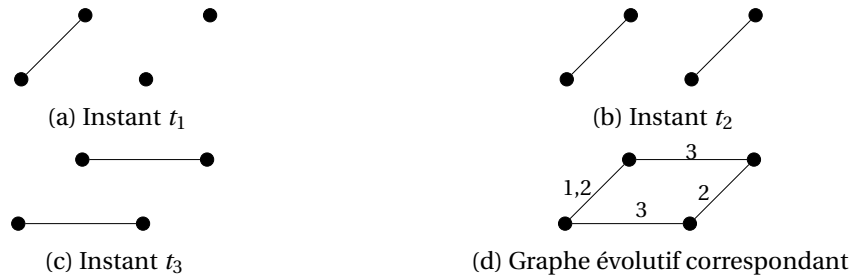


FIGURE 4.12 – Exemple d'un graphe évolutif

Un graphe évolutif est composé du triplet suivant (G, S_G, S_T) . $G = (V(E), E(G))$ est le graphe sous-jacent composé de tous les sommets et de toutes les arêtes qui existent au moins une fois dans le domaine temporel T . $S_G = G_0, G_1, \dots$, avec $G_i = (V(G_i), E(G_i))$, est une séquence de sous-graphes statiques de G correspondant chacun à la topologie du graphe sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$. Enfin $S_T = T_0, T_1, \dots$, est la séquence des dates de survenue des événements topologiques.

Gestion de la dynamique du réseau

Le passage des calculs locaux sur les graphes statiques (GRS) à DAGRS permet de prendre en compte l'apparition et la disparition des arêtes entre les sommets, il est donc possible d'exprimer la dynamique du graphe par un système de ré-étiquetage. Son expression est réalisée au moyen des graphes évolutifs introduits précédemment et que nous utilisons afin de décrire les différents trajets (chemins pour les graphes statiques) existant dans un graphe dynamique.

Réaction à un événement topologique. Le formalisme de DAGRS permet de représenter la réaction d'un système lorsqu'un événement topologique survient dans le graphe. Le modèle propose

pour cela deux types de règles qui décrivent l'apparition et la disparition d'une arête, et qui sont illustrées dans la figure 4.13.

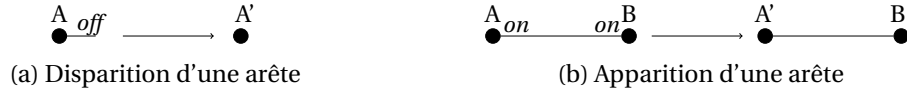


FIGURE 4.13 – Exemples de réactions à des événements topologiques avec DAGRS

Notion de trajet. Dans un graphe statique G , un chemin entre deux sommets a et b est composé d'une suite finie de sommets voisins. L'ajout de la composante temporelle dans les graphes évolutifs entraîne la notion de chemin temporel ou trajet. La notion de trajet se définit de la manière suivante : Soit $\mathcal{G} = (G, S_G, S_T)$ un graphe évolutif, soit un chemin $P = e_1, e_2, \dots, e_k$ où $e_i \in E_G$ et une suite croissante de dates $P_\sigma = \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$ où $\sigma_i \in T$. Le couple $J = (P, P_\sigma)$ est un trajet dans $\mathcal{G}$ si et seulement si $\forall \sigma_i \in P_\sigma, e_i \in G_{\text{predecesseur}(\sigma_i)}$. Un trajet d'un sommet a vers un sommet b sera noté $J_{(a,b)}$. Il est important de souligner que la notion de trajet n'est pas symétrique : l'existence d'un trajet d'un sommet a vers un sommet b n'implique pas l'existence d'un trajet de b vers a . On définit plusieurs types de trajets [CFQS11] : le trajet strict qui est composé d'arêtes présentes à des intervalles de temps différents ; le trajet au plus court qui comporte le nombre minimal de sommets à traverser ; le trajet au plus tôt dont la date d'arrivée est la plus faible. Le trajet le plus rapide dont la traversée se fait le plus rapidement possible.

4.6.3 Modèle ADAGRS

Le modèle Asynchronous Dynamicity Aware Graph Relabeling System (ADAGRS) se présente comme une variante du modèle DAGRS et s'appuie sur une version asynchrone des communications qui s'effectue par passage de message [Lap12]. Le modèle de calcul introduit par ADAGRS repose sur une interaction asynchrone des nœuds appelée LC0 cellulaire asynchrone (plus faible que le LC0 cellulaire), illustrée par la figure 4.14.



FIGURE 4.14 – LC0 asynchrone

Dans le modèle de calcul LC0 cellulaire asynchrone seul le sommet considéré peut modifier son état, le sommet adjacent peut quant à lui prendre part à d'autres synchronisations. Pour illustrer l'utilisation du modèle nous présentons un étiquetage simple de type $\{\langle \text{État sommet} \rangle, \langle \text{Identifiant} \rangle\}$. La règle de ré-étiquetage est la suivante $(A,i), (B,j) \rightarrow (C,i) (B,j)$ et est représentée figure 4.15.

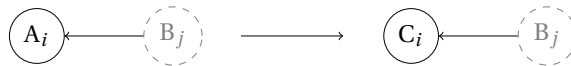


FIGURE 4.15 – Exemple d'une règle de ré-étiquetage en ADAGRS

En ADAGRS un élément de l'étiquette négligeable pour une règle exprimée peut être remplacé par le symbole "-". Lorsqu'un élément de l'étiquette est inconnu avant et après modification, celui-ci sera représenté par un "?". Comme pour le modèle DAGRS, ADAGRS permet de réagir face à la disparition d'un sommet. Le modèle s'enrichit également d'une représentation des événements détectés par les applications, où seul le sommet cible de l'événement peut le traiter. La gestion de ces événements se fait au travers d'une pile de type FIFO qui stocke les événements détectés. L'étiquetage est alors enrichi et devient : $\{\langle \text{Événement} \rangle, \langle \text{État sommet} \rangle, \langle \text{Identifiant} \rangle\}$. La représentation de ce type de cet étiquetage est donnée par la figure 4.16.

Où E est l'état du sommet, i l'identifiant du sommet et e l'événement détecté. Lorsque l'événement provient du nœud lui même (commandé par une application) le formalisme utilisé est



FIGURE 4.16 – Illustration de la gestion d'événements avec ADAGRS

représenté par la figure 4.17. À la suite de cet événement et en fonction des règles de ré-étiquetage le sommet peut changer d'état ou non.



FIGURE 4.17 – Gestion d'un événement applicatif en ADAGRS

ADAGRS permet de modéliser des messages via la représentation de files d'attente de type FIFO, la demande, la création et la diffusion d'un message ainsi que sa perte. Les liens de communication sont représentés en ADAGRS par des arcs entre les sommets. L'ensemble des messages envoyés et se trouvant sur l'arc sont traités par le récepteur comme une file FIFO, comme le montre la figure 4.18.

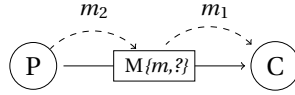


FIGURE 4.18 – Le nœud consommateur (C) et producteur (P) peuvent accéder simultanément à la file de message

Avec C le nœud récepteur du message m_2 et P le nœud émetteur du message m_2 . La file d'attente M contient l'ensemble des messages tels que m_1 est le premier message à être dépilé et m_2 le dernier message à être stocké dans la pile.

Dans le modèle, un lien peut être représenté par trois états différents. Le premier état représenté par un arc virtuel correspond à une estimation de présence de lien ; cette estimation peut être calculée par un processus de surveillance de trafic actif, passif ou hybride. Le deuxième état est l'exploitation effective du lien par l'émission. Le troisième état est la disparition d'un lien ; cet événement peut se produire lors de la disparition d'un lien potentiel comme d'un lien effectif qui engendre alors la perte des messages. Le lecteur souhaitant approfondir le sujet pourra se rapporter au document suivant [Lap12].

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les protocoles de routage et les techniques de découverte et d'évaluation de voisinage dans les réseaux terrestres et sous-marins. Nous avons également présenté un formalisme basé sur le ré-étiquetage de graphes qui permet de présenter les algorithmes de routage dans les réseaux mobiles.

Les techniques d'évaluation du voisinage dans les réseaux sans fil terrestres évaluent la qualité d'un lien, en se basant sur des informations physiques ou logiques. Ces techniques imposent l'utilisation d'un mécanisme de sondes des liens actifs (diffusion périodique de messages de sonde) ou passifs (durant l'échange de données). L'efficacité de ces techniques dans les réseaux mobiles est souvent mise à mal car elles ont besoin de constituer un historique important pour pouvoir évaluer la qualité d'un lien de manière précise. Par conséquent il est intéressant d'étudier l'efficacité des techniques d'estimation de qualité de lien se basant sur des informations logiques. En effet, les estimateurs physiques présentent l'inconvénient de pas donner une estimation capable d'être

corrélée avec le PRR tandis que les estimateurs de nouvelle génération nécessitent l'utilisation de chipset radio spécifique.

La découverte et l'évaluation du voisinage dans les réseaux sous-marins se font de manière différente, du fait de la faible bande passante, de la possible forte latence des communications et de la consommation énergétique importante des nœuds lors des phases de transmission. Par conséquent un nombre minimal de données doivent être échangées afin de limiter la consommation énergétique. L'échange de données de localisation qui peuvent être basées sur la profondeur permet aux nœuds de découvrir et d'évaluer le voisinage. Néanmoins, ces informations nécessitent la mise en place de techniques de localisation. Toutefois, lorsque différents systèmes évoluent dans un même réseau, il est très improbable qu'ils utilisent le même type d'information de localisation.

Les protocoles de routage proposent différentes stratégies en fonction de leur contexte d'utilisation. Lorsque la densité du réseau est importante une stratégie de routage de type MANET est préférable tandis que lorsque la densité diminue une stratégie de type DTN est plus adaptée. Une nouvelle tendance consiste à combiner ces deux approches en fonction du contexte. Dans les réseaux sous-marins les protocoles de routage utilisent aussi une stratégie de type MANET et DTN en fonction de la densité du réseau. Toutefois, contrairement aux protocoles terrestres, l'overhead induit doit être réduit au maximum car la transmission d'information est coûteuse en énergie.

Le modèle ADAGRS offre un formalisme intéressant pour représenter le déroulement d'algorithmes distribués communiquant par messages. Une version simplifiée sera adoptée afin d'illustrer les algorithmes développés dans cette thèse. Ce formalisme repose sur le modèle LC0 cellulaire asynchrone ainsi que le mode de communication par message.

Deuxième partie

Contributions & Résultats

Introduction

Les réseaux de systèmes autonomes sont caractérisés par une topologie dynamique composée de véhicules qui se déplacent à des vitesses distinctes et possèdent une mobilité propre en fonction de l'environnement de la mission. Cet environnement joue également un rôle majeur dans les communications puisqu'il perturbe le canal de communication ce qui peut conduire dans certains cas, notamment dans le milieu urbain, à dégrader fortement les performances du réseau. Les différents types d'engins peuvent par ailleurs évoluer dans des environnements de nature différente (air, terre et mer). Il convient donc de dissocier les engins sous-marins des autres types d'engins car ils utilisent un média de transmission différent. Cette différence implique par conséquent l'utilisation d'interfaces réseau elles aussi différentes. La pluralité des milieux de déploiement des engins entraîne des perturbations au niveau de la propagation du signal que l'on peut modéliser via des modèles déterministes et stochastiques. Nous nous sommes également intéressés aux missions assignées aux systèmes autonomes et avons montré que selon le type de mission à réaliser, il était nécessaire de déployer plusieurs véhicules de natures différentes. La réalisation de ces missions se traduit par l'affectation de missions locales à chaque système, missions locales qui permettent la réalisation d'une mission plus globale.

Il est donc nécessaire de faire coopérer ces systèmes grâce à la mise en place de protocoles qui permettent de rendre les engins interopérables. C'est dans ce sens que l'architecture JAUS [\[RW08\]](#) a été proposée. Elle définit les protocoles applicatifs utilisés et attribue une adresse à chaque élément d'un système afin de permettre de lui envoyer ou d'en recevoir des informations. Bien que les systèmes autonomes utilisent une pile protocolaire IP, les mécanismes et protocoles utilisés au niveau de la couche MAC sont fondamentalement différents lorsque l'on observe les réseaux terrestres utilisant la radio et les réseaux sous-marins utilisant l'acoustique. Ces différences imposent des modifications au niveau des protocoles réseaux et principalement au niveau des protocoles de routage. En effet, le coût énergétique des communications étant beaucoup plus important dans les réseaux sous-marins que les réseaux terrestres il convient à la fois de réduire le nombre et la taille des messages à transmettre. Parallèlement, le coût plus important des véhicules sous-marins par rapport aux véhicules terrestres se traduit par un réseau dont la densité est plus faible. Les réseaux terrestres sont quant à eux soumis à des problématiques concernant la dynamique du réseau due à la vitesse importante des engins, laquelle impacte la durée de vie des liens de communication.

Cette dualité conduit à utiliser des protocoles de routage distincts afin de répondre à des besoins propres à chaque milieu. Une solution naïve serait que chaque système utilise un protocole de routage spécifique où l'interconnexion de ces réseaux se ferait via des passerelles. Néanmoins, les protocoles de routage sous-marins utilisent généralement des informations de localisation spécifiques comme la profondeur ou encore la distance et l'angle entre deux nœuds, ce qui a pour conséquence l'utilisation de protocoles de routage différents pour chaque type de réseau-sous-marins. Ces protocoles sont également conçus pour les réseaux de capteurs fixes ou faiblement mobiles, dans lesquelles les nœuds sont transportés par le courant marin. Concernant les réseaux terrestres, des protocoles de routage ont été conçus pour supporter la mobilité des engins. Toutefois, ils se basent majoritairement sur le nombre de sauts pour évaluer et comparer les chemins. Cette approche est peu efficace et a été remplacée par une évaluation de la qualité des chemins, techniques utilisées dans les réseaux de capteurs. Contrairement aux réseaux sous-marins où les nœuds sont répartis de manière éparse, la densité des nœuds dans les réseaux terrestres évolue rapidement, par exemple il existe des zones denses et des zones éparses au cours du temps. Par

conséquent, l'utilisation d'une politique de routage hybride MANET/DTN permet à un protocole de s'adapter en fonction de la topologie courante du réseau. Néanmoins, la majorité des protocoles actuels sont de simples modifications de protocoles MANET traditionnels qui souffrent donc des mêmes défauts concernant l'évaluation de liens dans les réseaux mobiles.

L'absence d'un protocole de routage à la fois robuste et portable sur tous les types de systèmes autonomes nous conduit à développer un nouveau protocole capable d'acheminer des données à la fois dans les réseaux terrestres et sous-marins et qui adapte sa politique de routage (MANET ou DTN) en fonction de la topologie. Quatre contributions sont décrites dans cette partie : (i) un estimateur de qualité de lien pour les réseaux mobiles, (ii) un protocole de routage DTN pour les réseaux mobiles sous-marins, (iii) un protocole de routage hybride MANET/DTN pour les réseaux terrestres et (iv) un protocole unifiant les deux protocoles afin de permettre l'interconnexion des réseaux de systèmes autonomes.

Il est communément admis que la sélection d'un lien en se basant uniquement sur la distance entre la source et la destination est insuffisante pour obtenir les meilleures performances. Pour répondre à ce problème, des estimateurs de qualité ont été développés. Néanmoins la majorité d'entre eux ont été conçus pour les réseaux de capteurs statiques. Afin de permettre une estimation fiable de la qualité de lien dans les réseaux dynamiques nous décrivons dans le chapitre 5 de cette thèse un estimateur de qualité qui adapte son estimation en fonction de la stabilité du lien. Nous complétons ensuite cette estimation de la qualité par des estimateurs compagnons permettant de développer une métrique prédictive sur l'état des liens.

Les protocoles de routages sous-marins actuels ont été principalement développés pour les réseaux de capteurs fixes ou mobiles dont la mobilité dépend du courant marin. La majorité de ces protocoles se basent sur des informations de localisation, qui sont parfois propres à un type d'engin. Il est donc très difficile de faire coopérer des engins sous-marins différents. Pour résoudre ce problème, nous proposons dans le chapitre 6 de cette thèse un protocole de routage DTN n'utilisant aucune information de localisation et qui peut être déployé dans n'importe quel réseau sous-marin. Notre protocole s'appuie sur une machine à apprentissage afin de déterminer le meilleur choix à effectuer. Cette sélection se base à la fois sur le niveau d'énergie du nœud et sur le délai d'acheminement des données proposés par un nœud pour une destination.

Les différents systèmes autonomes terrestres et aériens peuvent former des réseaux denses ou épars. Il est donc important d'adapter la stratégie de routage (MANET ou DTN) en fonction du contexte. Nous décrivons dans le chapitre 7 de cette thèse un protocole hybride MANET/DTN qui intègre dans son processus de routage les multi-estimateurs décrits dans le chapitre 5, afin d'anticiper les coupures de liens. Ces estimateurs permettent également d'estimer la qualité d'un lien, information qui est utilisée par le protocole pour déterminer la qualité d'un chemin. Lorsque aucune route n'est disponible le protocole adopte une stratégie de routage DTN inspirée de celle décrite dans le chapitre 6.

Le chapitre 8 aborde la dernière contribution de cette thèse qui consiste à intégrer les deux protocoles de routage précédents afin de permettre l'interopérabilité entre les systèmes terrestres et marins. Pour cela, nous définissons la notion d'interface virtuelle qui permet d'agréer et de gérer les interfaces radios et acoustiques. Nous proposons également un système de gestion de groupes basé sur le type de véhicules et les missions exécutées. Il devient alors possible d'exploiter la technique de diffusion anycast, en acheminant les données non plus vers un nœud unique mais vers n'importe quel nœud appartenant à un groupe.

L'ensemble des contributions réalisées ont été testées avec le simulateur ns-3 [RH10]. Il permet de simuler les environnements aérien, terrestre et sous-marin à travers l'utilisation de modèles intégrant la mobilité des engins ainsi que des phénomènes de propagation du signal réalistes. C'est pourquoi il est le simulateur de référence dans cette thèse. Afin d'étendre les modèles de mobilité des engins nous avons eu recours au générateur de scénario BonnMotion [AEGPS10] pour générer des traces de mobilité que nous utilisons dans ns-3. Nous veillons pour chaque scénario à décrire l'ensemble des paramètres associés aux modèles de mobilité et aux modèles de propagation afin que le lecteur puisse reproduire les simulations. Pour chaque environnement de simulation nous

avons sélectionné les modèles et les paramètres associés afin d'obtenir des scénarios les plus réalistes possible à la fois en termes de mobilité et en termes d'environnement de propagation.

Chapitre 5

Estimateurs prédictifs d'état des liens pour les réseaux mobiles

« *Innovation is serendipity, so you don't know what people will make.* »

Tim Berners-Lee

Sommaire

5.1 Introduction	89
5.2 Étude de l'estimateur ETX	90
5.2.1 Surveillance du lien	91
5.2.2 Mesure du taux de réception	92
5.2.3 Analyse de l'impact de la taille de la fenêtre	92
5.3 Conception de l'estimateur de qualité de lien	95
5.3.1 Algorithme de réduction de fenêtre	95
5.3.2 Algorithme d'accroissement de fenêtre	95
5.3.3 Analyse temporelle	96
5.3.4 Analyse statistique	97
5.3.5 Bilan & Discussion	99
5.4 Les estimateurs compagnons	100
5.4.1 Présentation des estimateurs	100
5.4.2 Évaluations	102
5.4.3 Discussion	106
5.5 Conclusion	106

5.1 Introduction

La mobilité des nœuds que nous considérons induit une topologie dynamique du réseau. Celle-ci dépend de la vélocité des nœuds mais également de leur liberté de mouvement. L'environnement dans lequel ils évoluent joue également un rôle dans cette dynamique puisqu'il perturbe la propagation du signal. L'enjeu pour les protocoles de routage est de prendre en compte cette dynamique afin de maximiser le taux de paquets délivrés et de minimiser le délai d'acheminement des paquets. Les protocoles doivent donc disposer d'une information fiable sur l'état des liens et plus globalement d'un chemin entre deux nœuds dit connectés. La technique historique consistait

à évaluer le nombre de sauts que doit effectuer un message à travers le réseau pour être transmis à une destination. De Couto et al. [DCACM03] ont démontré que cette technique est insuffisante pour sélectionner le meilleur lien/chemin, car elle ne prend pas en compte les propriétés des liens, par exemple leur taux de perte.

Les estimateurs de qualité de lien quantifient la qualité d'un lien à partir de l'état de réception des paquets (reçus ou perdus). Cette quantification est obtenue à partir d'informations acquises soit au niveau de la couche physique soit au niveau des couches supérieures. Les estimateurs basés sur les informations physiques fournissent rapidement une information, mais qui est trop approximative lorsque le lien est instable. Une nouvelle génération d'estimateurs plus précis a été proposée mais ceux-ci nécessitent d'être implémentés au sein même de la puce radio. Les estimateurs utilisant les informations retournées par les couches supérieures évaluent la qualité des liens selon les critères de l'application, comme le taux de paquets reçus. Cependant, ces estimateurs ont été majoritairement conçus pour les réseaux de capteurs dont la mobilité est faible voir inexistante. Par conséquent, ils sont inadaptés pour les réseaux mobiles.

Une nouvelle métrique appelée Fast-ETX (F-ETX) est décrite dans ce chapitre. Elle est composée de quatre estimateurs qui permettent d'évaluer et de prédire l'état d'un lien. Chacun évalue une propriété spécifique du lien : (i) sa qualité à court terme; (ii) sa qualité à long terme; (iii) sa stabilité et (iv) sa capacité à devenir unidirectionnel. Contrairement aux estimateurs classiques, notre métrique effectue un échantillonnage de l'état de réception des paquets attendus en utilisant une fenêtre glissante dont la taille varie en fonction de la perte des paquets. Cette fenêtre est gérée par deux algorithmes, l'un dédié à sa réduction et l'autre à son accroissement. L'utilisation d'une fenêtre dynamique permet d'adapter la sensibilité et la précision des estimateurs. Ce mécanisme rend donc la métrique utilisable à la fois dans les réseaux statiques et dans les réseaux mobiles.

Ce chapitre est organisé en trois parties. Dans la première partie, une analyse de l'estimateur ETX est proposée, où nous étudions l'influence de la taille de la fenêtre sur la réactivité et la précision de l'estimation de la qualité d'un lien. À partir de ces observations, un nouvel estimateur de qualité de lien F-ETX est proposé dont nous détaillons la conception et évaluons les performances. Dans la dernière partie de ce chapitre nous décrivons et testons les estimateurs compagnons que nous avons développés et dont nous montrons les propriétés prédictives.

5.2 Étude de l'estimateur ETX

L'idée sous-jacente à ETX [DCABM03] est de quantifier la qualité d'un lien en calculant le nombre nécessaire de tentatives de transmissions d'un paquet afin qu'il soit reçu avec succès. Pour cela, deux ratios sont calculés : le premier (d_f) correspond aux paquets transmis avec succès à un voisin (figure 5.1a), le second (d_r) correspond aux paquets reçus en retour (figure 5.1b).



FIGURE 5.1 – Évaluation des liens avec ETX

Afin de déterminer ces deux ratios, ETX utilise une technique de surveillance active basée sur l'envoi périodique d'un paquet de sonde. À partir de ces ratios, la probabilité qu'un paquet soit transmis et acquitté est donnée par la formule $d_f \times d_r$. Si l'on considère qu'une tentative de transmission suit une loi de Bernouilli (succès ou échec)¹ alors l'estimation de la qualité d'un lien s'exprime par :

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r}. \quad (5.1)$$

1. L'état d'un paquet attendu peut être représenté par une valeur binaire.

Cette qualité peut également être déterminée en fonction des paquets perdus :

$$ETX_l = \frac{1}{(1 - d_f) \times (1 - d_r)}. \quad (5.2)$$

L'estimation fournie par ETX résulte d'une succession de processus que nous illustrons en figure 5.2. Le premier consiste à constituer un historique des paquets observés par l'utilisation d'un mécanisme de fenêtrage glissant. Le second consiste à déterminer le taux de perte en quantifiant les paquets reçus et perdus (décrit dans la section ci-dessous). À partir de ces informations, les ratios d_f et d_r sont calculés afin de déterminer la qualité d'un lien.

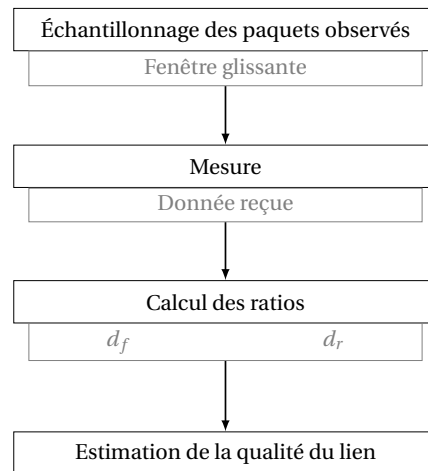


FIGURE 5.2 – Fonctionnement de ETX

5.2.1 Surveillance du lien

Le calcul des ratios d_f et d_r nécessite de constituer un historique de l'état des paquets attendus, afin de compter les paquets reçus. Cette étape ne peut être réalisée qu'avec une méthode de surveillance active. Les paquets de sonde peuvent être diffusés en point à point ou bien à tous les nœuds voisins. La seconde solution est la plus utilisée par les protocoles de routage, puisqu'elle permet de limiter le nombre de paquets transmis. Puisque les liens sont testés périodiquement à l'aide de paquets de contrôle afin de vérifier leur présence ou leur disparition, une évaluation de sa qualité peut être effectuée dans le même temps.

Les nœuds envoient un paquet de sonde à intervalle régulier. Chaque paquet reçu est alors comptabilisé afin de déterminer le taux de réception des messages transmis par le nœud voisin considéré². Ce taux représente alors la probabilité de recevoir un paquet transmis par un voisin et peut être assimilé à d_r . En pratique le ratio d_f est calculé par les nœuds, et non échangé entre eux au sein des paquets de sonde. Ce ratio est alors calculé par un nœud lors de la réception de ses propres paquets de sonde (qui correspond à la probabilité qu'un paquet soit transmis et acquitté). Chaque nœud doit donc retransmettre automatiquement les paquets de sonde de ses voisins. Cette technique permet d'éviter l'ajout d'un champ supplémentaire dans les paquets de contrôle des protocoles de routage, et de laisser uniquement au nœud récepteur la charge de déterminer les deux ratios. Il est par ailleurs impératif d'implémenter un mécanisme d'évitement de tempête de broadcast afin de ne pas congestionner le réseau. Il est également indispensable de désynchroniser les communications des nœuds afin que les transmissions n'entrent pas en collision. On utilise pour cela une gigue aléatoire qui ne doit pas être inférieure à la période d'envoi des paquets de sonde. Enfin, les deux ratios étant calculés à partir d'observations différentes, l'estimateur ETX doit maintenir deux fenêtres d'échantillonnage distinctes.

2. Le nombre total des paquets envoyés est connu puisque les nœuds possèdent le même intervalle d'envoi.

5.2.2 Mesure du taux de réception

La mesure du taux de réception des paquets est effectuée à partir d'une information temporelle ou d'un numéro de séquence.

L'utilisation d'une information temporelle a été proposée par De Couto et al. [DCABM03]. Chaque nœud maintient plusieurs timers pour déterminer la réception ou la perte d'un paquet de sonde. Si un paquet attendu arrive avant la fin de la période définie, il est considéré comme reçu, sinon il est considéré comme perdu. Cette approche permet également de mesurer le temps aller-retour d'un paquet, et donne une information sur la latence présente dans le réseau. Cette solution s'avère toutefois coûteuse, étant donné qu'il est nécessaire de maintenir un timer pour chaque paquet envoyé. La charge supportée par le nœud peut également augmenter en fonction de la durée de maintien du timer et de la périodicité d'envoi des paquets.

L'utilisation d'un numéro de séquence a été proposée dans le but de supplanter l'utilisation d'une information temporelle. Cette solution plus économique en mémoire et plus simple à implémenter a été retenue dans la quatrième version de l'algorithme de routage BATMAN IV. Elle consiste à utiliser un numéro de séquence attribué de manière unique à chaque paquet envoyé. Puisque les paquets sont envoyés périodiquement, un paquet est considéré perdu, s'il n'est pas réceptionné avant la prochaine période d'envoi. L'utilisation d'une fenêtre glissante permet de maintenir un historique à jour de l'état des paquets observés. On distingue deux types de fenêtres, statique dont la taille est fixe et semi-statique dont la taille augmente tant qu'elle n'a pas atteint sa taille maximale. L'algorithme 1 décrit la gestion d'une fenêtre semi-statique lorsqu'un paquet est reçu.

Algorithme 1 Gestion d'une fenêtre semi-statique

INPUT: SN : numéro de séquence

INPUT: fenêtre : tableau contenant l'état des paquets reçus

INPUT: TAILLE_MAX_FENÊTRE : taille maximale de la fenêtre

```
1: function RECEPTION D'UN PAQUET(fenêtre, SN, TAILLE_MAX_FENÊTRE)
2:   if SN < fenêtre[0].SN then                                ▷ On se situe à gauche de la fenêtre
3:     supprimer paquet
4:   else
5:     if SN < fenêtre[fenêtre.taille-1].SN then                ▷ On se situe dans la fenêtre
6:       fenêtre[SN-fenêtre[0].SN].Reçu ← VRAI
7:     else                                                    ▷ On se situe à droite de la fenêtre
8:       Compteur ← (SN-1)-fenêtre[fenêtre.taille-1]
9:       while Compteur > 0 do
10:        fenêtre ← fenêtre.décallée()                        ▷ L'état le plus ancien est supprimé
11:        Compteur ← Compteur-1
12:      end while
13:      if fenêtre.taille < TAILLE_MAX_FENÊTRE then
14:        fenêtre.SetTaille() ← fenêtre.taille() + 1
15:      else
16:        fenêtre ← fenêtre.décallée()
17:      end if
18:      fenêtre[fenêtre.taille-1].Reçu ← VRAI
19:    end if
20:  end if
21: end function
```

5.2.3 Analyse de l'impact de la taille de la fenêtre

Nous nous intéressons à l'impact de la taille de la fenêtre statique sur la réactivité de ETX pour déclarer un évènement (coupure du lien, qualité de lien maximale) ainsi que sur la préci-

sion des qualités estimées. Pour ce faire, nous utilisons le simulateur JbotSim [Cas15] utilisé pour la conception d'algorithmes distribués dans des environnements où les nœuds peuvent être mobiles. Il nous permet d'étudier les performances d'ETX sans utiliser une pile protocolaire.

L'étude menée se focalise sur l'estimation donnée par ETX_l ³ sur un lien entre deux nœuds voisins. Le scénario de simulation définit un environnement où deux nœuds s'échangent périodiquement des messages de sonde. Ces messages contiennent trois champs, (i) le numéro de séquence, (ii) l'identifiant du nœud créateur du message, et (iii) l'identifiant du nœud ayant retransmis le message. Lors de la création d'un message, le nœud affecte le premier champ avec son numéro de séquence courant, et aux deux derniers champs son identifiant. Lorsqu'un nœud retransmet un message, il met à jour le troisième champ avec son propre identifiant. Afin d'éviter la retransmission infinie d'un message, un nœud ne retransmet pas un paquet qu'il a déjà transmis.

Réactivité de l'estimateur

Un lien est découvert dès lors qu'un paquet est marqué reçu dans une des deux fenêtres. Selon l'équation 5.3, plus la qualité estimée tend vers 1 plus la probabilité de devoir ré-émettre un paquet est forte. À l'inverse, plus la qualité estimée tend vers $+\infty$ plus la probabilité de devoir ré-émettre le paquet est faible.

$$\lim_{\substack{d_f \rightarrow 0 \\ d_r \rightarrow 0}} ETX_l = 1 \qquad \lim_{\substack{d_f \rightarrow 1 \\ d_r \rightarrow 1}} ETX_l = +\infty \qquad (5.3)$$

La valeur maximale de la qualité estimée est atteinte lorsque chacune des deux fenêtres maintenues pour les ratios d_f et d_r atteint sa taille maximale. On pourra noter qu'il existe un décalage de progression entre les deux fenêtres. Si l'on considère qu'aucune perte de paquets ne survient, alors la progression de la fenêtre associée à d_r est décalée en raison d'un délai d'aller-retour du message aussi appelé RTT. À chaque intervalle P , un message envoyé, sera donc reçu par son créateur après un temps de RTT_b . Si on définit n comme étant la taille maximale des fenêtres maintenues alors la qualité maximale est atteinte après une période égale à $nP + RTT_b$. La figure 5.3a montre l'impact de la taille de la fenêtre sur le temps de convergence de la métrique pour évaluer un lien avec une qualité maximale estimée. Cette estimation est normalisée entre $[0, 255]$ afin de correspondre aux valeurs données par les implémentations des estimateurs de qualité de lien.

Un lien est déclaré rompu lorsque la métrique ETX_l est égale à 1. La coupure d'un lien entraîne donc la perte des paquets qui selon le cas de figure peut être détectée en premier par la fenêtre associée à d_f ou d_r . Un décalage de progression entre les deux fenêtres peut alors survenir ce qui borne la détection d'une rupture de lien sur l'intervalle $[nP, nP + P]$. La figure 5.3b montre le temps de convergence de la métrique à travers un diagramme en bâtons afin de mieux observer le temps de détection de rupture d'un lien.

Un lien unidirectionnel est détecté par le ratio d_f qui mesure la capacité d'un voisin à renvoyer un paquet de sonde reçu. Lorsqu'un lien est unidirectionnel seul les paquets émis par les voisins peuvent être reçus, alimentant d_r mais, laisse d_f à une valeur nulle ou à une valeur très faible. La rapidité de détection d'un lien unidirectionnel dépend elle aussi de la taille de fenêtre maintenue pour calculer d_r . Nous avons simulé la transformation d'un lien bidirectionnel en lien unidirectionnel et observé l'impact de la taille de la fenêtre sur le temps de détection. Les résultats obtenus sont présentés par la figure 5.3c.

Précision de l'estimateur

Nous appelons granularité de l'estimation "le nombre de valeurs que peut prendre celle-ci". La taille des fenêtres a un impact sur la granularité des estimations et donc la précision de l'estimateur. Le maintien d'une fenêtre de petite taille permet à l'estimateur de converger rapidement en son maximum ainsi qu'en son minimum. À l'inverse, le maintien d'une fenêtre plus large, fait converger l'estimation plus lentement, mais permet d'augmenter la précision. Sachant que l'état

3. Son utilisation est plus intuitive, plus la valeur augmente meilleure est la qualité

de réception des paquets au sein d'une fenêtre peut être représenté par un état binaire et que l'ordre des valeurs stockées n'a pas d'importance, alors on peut alors voir la fenêtre comme une combinaison avec répétition. Soit n l'état binaire de réception des paquets et k la taille de la fenêtre alors le nombre total de combinaisons au sein d'une fenêtre s'exprime comme :

$$\begin{aligned} C_k^{n+k-1} &= \frac{(n+k-1)!}{k!(n-1)!}, \\ &= \frac{(k+1)!}{k!(1)!}, \\ &= k+1. \end{aligned} \tag{5.4}$$

Pour une fenêtre de taille k , il y a donc $k+1$ combinaisons possibles. Le maintien de deux fenêtres ayant une même taille, k , permet donc d'avoir $2(k+1)$ estimations possible de qualité du lien. La figure 5.3d montre la relation entre la taille des fenêtres et la granularité de l'estimation.

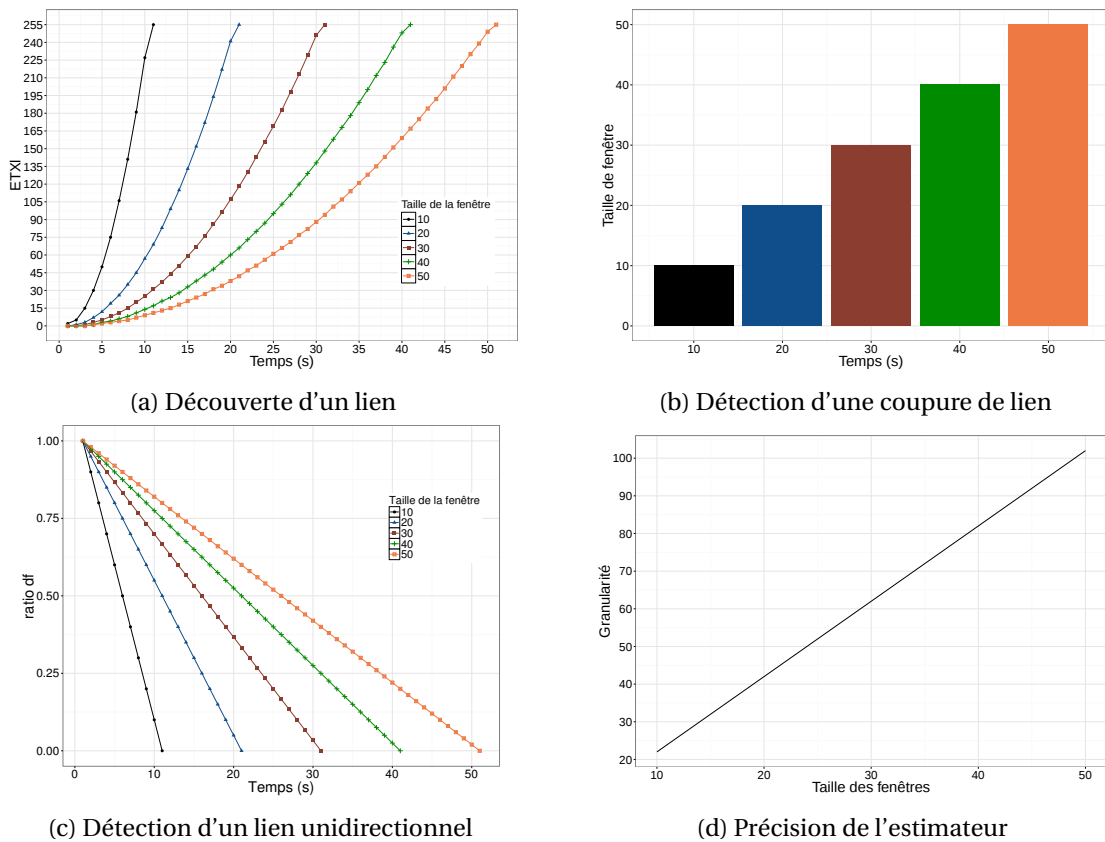


FIGURE 5.3 – Performance du mécanisme de fenêtrage de ETX

Observation

À partir des analyses précédentes, on peut observer deux phénomènes. Le premier est que l'utilisation d'une fenêtre de petite taille est adaptée lorsque la durée d'un lien entre deux nœuds est faible. Ce cas de figure se présente notamment dans les réseaux qui possèdent une topologie dynamique et où les communications sont fortement perturbées. À l'inverse, le maintien d'une fenêtre plus importante est adapté lorsque la durée de vie d'un lien est importante. Le second est que l'utilisation d'une fenêtre statique ou semi-statique implique donc un compromis entre le temps de convergence de l'estimation et sa précision. C'est pourquoi, dans les réseaux mobiles où les liens de communication possèdent une durée de vie et un taux de perte variables, l'utilisation d'une fenêtre statique ou semi-statique ne permet pas de caractériser correctement la qualité des liens.

5.3 Conception de l'estimateur de qualité de lien

Dans le but de résoudre les problèmes induits par l'utilisation d'une fenêtre statique et semi-statique, un mécanisme de fenêtrage dynamique dont la taille s'ajuste en fonction du taux de perte du lien est proposé dans cette thèse. Le redimensionnement des fenêtres permet d'ajuster la granularité des estimations (précision) et la réactivité de l'estimateur. La gestion du redimensionnement des fenêtres est effectuée par deux algorithmes.

5.3.1 Algorithme de réduction de fenêtre

La réactivité d'un estimateur est une caractéristique fondamentale. Pour cela, l'algorithme observe l'état des paquets stockés dans la fenêtre. Soit un paquet p appartenant à un ensemble fini de paquets observés $P = \{p_0, p_1, p_2, p_{n-1}\}$ avec n le nombre d'observations. L'état de réception de chaque paquet p est représenté par un label $L \in \{0, 1\}$, 0 indiquant une perte et 1 indiquant une réception. Le nombre de paquets considérés comme reçus, a et perdus, $\bar{a}$ peut alors être calculé :

$$\begin{aligned} n &= a + \bar{a}, \\ a &= \sum_{i=1}^n L_i, \\ \bar{a} &= n - \sum_{i=1}^n L_i. \end{aligned} \quad (5.5)$$

L'algorithme de réduction de la fenêtre utilise l'information sur le nombre de paquets perdus pour réduire la taille de la fenêtre. L'algorithme procède à une réduction de la taille de la fenêtre pour augmenter la sensibilité de l'estimateur afin de détecter une éventuelle coupure du lien au plus tôt. La taille de la fenêtre, n est alors réduite en fonction du nombre de paquets considérés comme perdus, selon la formule :

$$n = \frac{n}{2^{\bar{a}}}. \quad (5.6)$$

Dans le cas d'une perte successive des paquets, l'algorithme réduit n de manière exponentielle. Cette phase de réduction peut réduire la fenêtre jusqu'à une taille minimale de 2 afin de conserver un historique minimum. La figure 5.4 illustre le processus de réduction d'une fenêtre.

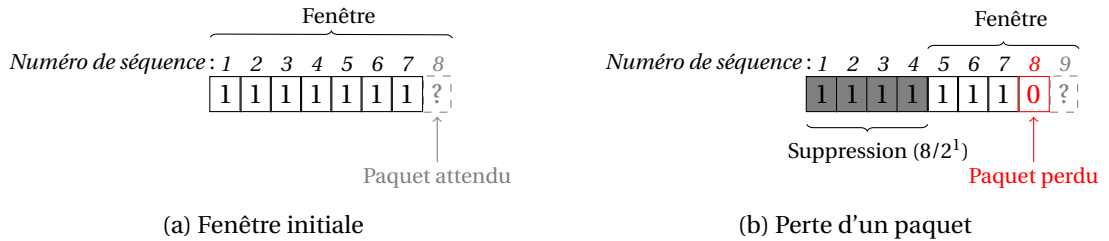


FIGURE 5.4 – Mécanisme de décroissance de la fenêtre

5.3.2 Algorithme d'accroissement de fenêtre

Afin d'assurer une estimation fiable et précise, la taille de la fenêtre doit être ajustée en fonction de la stabilité/instabilité du lien. Lorsqu'un paquet est reçu, on détermine si on doit augmenter la taille de la fenêtre ou bien si elle doit être décalée. L'algorithme utilise un seuil appelé T_h qui sauvegarde la taille de la fenêtre courante dès qu'un paquet est déclaré perdu. Lorsqu'un paquet est à nouveau reçu, si la taille de la fenêtre est inférieure à T_h , elle est augmentée de un. Cette phase est appelée *phase de recouvrement*. Lorsque la taille de la fenêtre est supérieure à T_h , un compteur C est incrémenté pour chaque nouveau paquet reçu. Lorsque la valeur du compteur atteint la moitié de la taille de la fenêtre courante, celle-ci est augmentée de un. La vitesse d'accroissement de la fenêtre dépend donc de la valeur du seuil T_h et permet d'ajuster la taille de la fenêtre en

fonction de la stabilité du lien; cette phase est appelée *perception de la stabilité*. L'algorithme 2 décrit le fonctionnement de l'algorithme d'accroissement de la fenêtre.

Algorithme 2 Accroissement de la fenêtre

INPUT: W : taille de la fenêtre

if $W \geq T_h \wedge C \geq \frac{W}{2}$ **then**

$W \leftarrow W + 1$

$C \leftarrow 0$

else

$W \leftarrow W.décalée()$

$C \leftarrow C + 1$

end if

5.3.3 Analyse temporelle

Nous avons testé avec le simulateur JbotSim [Cas15] l'efficacité de la fenêtre dynamique couplée à l'algorithme de réduction de la taille de la fenêtre. Nous comparons les performances obtenues avec notre fenêtre dynamique et des fenêtres statiques de différentes tailles. Les résultats de cette comparaison présentés dans le tableau 5.1 montrent que l'algorithme de réduction de fenêtre permet d'avoir une meilleure réactivité, donc de détecter plus rapidement la perte d'un lien.

TABLEAU 5.1 – Temps de détection d'une rupture de lien

Taille max de la fenêtre	Fenêtre statique	Fenêtre dynamique
50	50s	5s
30	30s	4s
10	10s	3s

Afin d'observer l'influence des algorithmes sur la taille des fenêtres, nous affichons dans la figure 5.5 la taille des fenêtres lorsque survient une coupure d'un lien. Une coupure entraîne l'effondrement de la taille des fenêtres afin de détecter au plus tôt la disparition du lien. Lorsque des paquets sont à nouveau reçus, l'algorithme d'accroissement des fenêtres entre alors dans la *phase de recouvrement*. La taille des fenêtres augmentent alors de 1 pour chaque nouveau paquet reçu jusqu'à atteindre la taille qu'elles avaient lors de la dernière perte. Une fois que la taille courante des fenêtres a atteint la valeur de T_h , celles-ci ralentissent leur progression afin de calibrer l'estimation de la qualité du lien en fonction de sa stabilité; c'est la *phase de perception de la stabilité*.

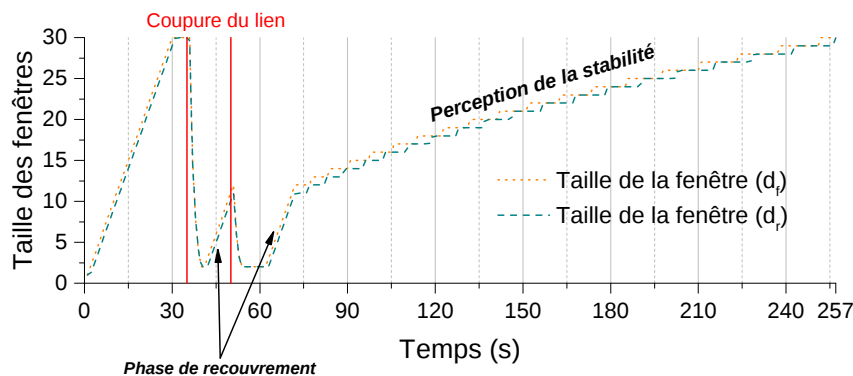


FIGURE 5.5 – Comportement des fenêtres dynamiques de la métrique F-ETX

5.3.4 Analyse statistique

Pour compléter l'analyse temporelle, des analyses statistiques sont effectuées afin d'étudier la consommation énergétique, la stabilité et la fiabilité des estimateurs. Pour cela, nous simulons deux scénarios réalistes avec le simulateur ns-3 [RH10]. Ces deux scénarios définissent des environnements représentatifs où peuvent évoluer des véhicules terrestres. Le premier scénario définit un environnement urbain pour les réseaux véhiculaires, le second définit une scène de catastrophe où des UGVs ont pour objectif d'inspecter des POIs.

Dans le premier scénario, 40 véhicules ayant une vitesse moyenne de 30m/s évoluent sur une zone de $200m \times 200m$ suivant le modèle de mobilité Manhattan (4×4) [ET]. Nous définissons des propriétés de propagation du signal propres aux milieux urbains en utilisant un modèle Three-LogDistance dont les paramètres ont été déterminés selon [BNO12]. Le modèle Nakagami quant à lui est paramétré de façon à représenter un modèle de Rayleigh. Dans le second scénario, 40 véhicules sont déployés sur une zone de $275m \times 250m$ et suivent un modèle de mobilité de type DisasterModel [AGPM09] où nous avons défini des POIs. Le modèle de propagation décrit un milieu en espace libre par un modèle de type Friis et un modèle Nakagami. Le tableau 5.2 résume les paramètres de la couche MAC ainsi que ceux du simulateur.

TABLEAU 5.2 – Paramètres de simulation

	1 ^{er} scénario (Manhattan)	2 nd scénario (Disaster)
Paramètres PHY		
Puissances Tx/Rx (dbm)	0	0
Gain antennes (dB)	0	0
Puissance de détection (dbm)	-96	-96
Paramètres MAC		
Standard	802.11g	802.11g
Débit	6 Mpb	6 Mpb
Adaptation de débit	ARF	ARF
Paramètres des modèles de propagation		
Shadowing	ThreeLogDistance d0 : 1, d1 : 75, d2 : 114 exp0 : 2.5, exp1 : 5, exp2 : 10	Friis Fréquence : 2.4GHz
Fast-fading	Rayleigh	Nakagami m0 : 1.5, m1 : 0.75, m2 : 0 d1 : 80, d2 : 320
Variables du simulateur		
Seed	5155236	5155236
Run	9287851	9287851

Consommation énergétique

De manière générale, les engins sont équipées d'une batterie ce qui limite leur durée de vie. Il est donc important de caractériser la consommation énergétique des estimateurs. Celle-ci est

mesurée pour les estimateurs ETX et F-ETX dans les deux scénarios présentés précédemment. Afin de quantifier cette consommation, nous utilisons un modèle de batterie ion-lithium (modèle LilonEnergySource) et un modèle de consommation énergétique basé sur les transmissions (WifiRadioEnergyModel) dont les paramètres sont donnés dans le tableau 5.3.

TABEAU 5.3 – Consommation énergétique du modèle WifiRadioEnergy

Actions	Transmission	Réception	Au repos	Inactive
Puissance consommée (W)	1.14	0.94	0.82	0.10

Les courbes de la figure 5.6 montrent la consommation énergétique moyenne des estimateurs ETX et F-ETX en fonction du nombre de nœuds dans le réseau. Pour chaque mesure de la moyenne (représentée par un point ou un carré) nous ajoutons la valeur de l'écart type correspondant. On observe dans les deux scénarios que plus le nombre de nœuds augmente plus la consommation énergétique est importante du fait de l'augmentation du nombre de transmissions. La consommation énergétique est par ailleurs plus importante dans le scénario Disaster que dans le scénario Manhattan. Les perturbations dans le scénario de type Manhattan étant plus conséquentes, un plus grand nombre de paquets est donc perdu et donc non retransmis par les nœuds, ce qui diminue le nombre de transmissions. On peut observer que l'évolution de la consommation dans le scénario Disaster est légèrement plus faible lorsque 40 nœuds sont déployés dans le réseau. Ce phénomène est expliqué par l'augmentation du nombre de collisions entre les messages de sonde, ce qui a pour conséquence d'augmenter le taux de perte des messages et donc de diminuer le trafic échangé. Par conséquent, le nombre de messages retransmis par les nœuds diminue et permet de diminuer la consommation énergétique. Enfin, la consommation énergétique des deux estimateurs est semblable puisqu'ils émettent les messages de sonde à la même fréquence.

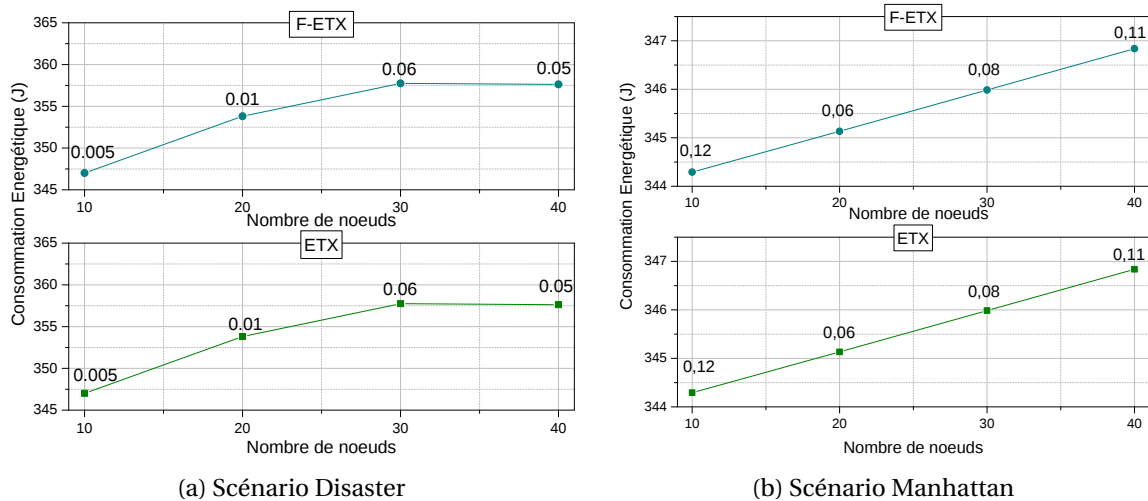


FIGURE 5.6 – Consommation énergétique des estimateurs ETX et F-ETX

Stabilité

Le coefficient de variation est défini comme le ratio entre l'écart type et la moyenne et permet d'étudier la stabilité/instabilité de l'estimation. Le coefficient de variation a été calculé à partir des estimations fournies par ETX et F-ETX avec une taille de fenêtre maximale de 15. La figure 5.7 montre les résultats obtenus. L'environnement de propagation dans le scénario urbain étant le plus défavorable, l'estimation faite par ETX est moins stable dans le scénario de type Manhattan que dans le scénario de type Disaster. Au contraire, l'estimateur F-ETX possède la même stabilité dans les deux scénarios puisque l'estimation est adaptée en fonction de la stabilité du lien. Par conséquent F-ETX fournit une estimation plus stable que ETX.

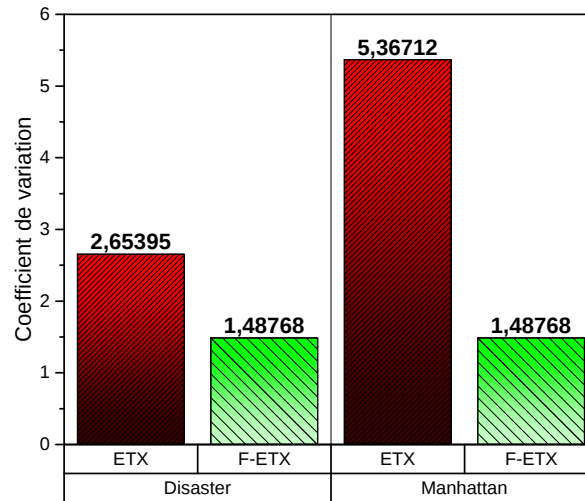


FIGURE 5.7 – Coefficient de variation des estimateurs de qualité

Fiabilité

La fonction de distribution cumulative (CDF) empirique montre la répartition des estimations fournies par ETX et F-ETX. Elle permet d'observer si les estimateurs ont tendance à surestimer ou à sous-estimer la qualité d'un lien. Elle permet ainsi d'étudier la fiabilité de l'estimateur. La figure 5.8 montre les CDFs empiriques obtenues pour les estimateurs ETX et F-ETX⁴. On observe que ETX a tendance à sous-estimer la qualité de lien. Dans le scénario disaster, 90% des liens sont estimés avec une qualité ≤ 25 , et dans le scénario de type manhattan on passe à 97%. F-ETX caractérise mieux la qualité de lien puisque la pente de la courbe représentant la CDF est moins abrupte. Bien que plus de la moitié des liens soient estimés avec une qualité inférieure à 10, 40% des liens restant sont évalués avec une qualité comprise entre 10 et 255. L'estimation fournie par F-ETX caractérise donc mieux la qualité de lien que celle fournie par ETX.

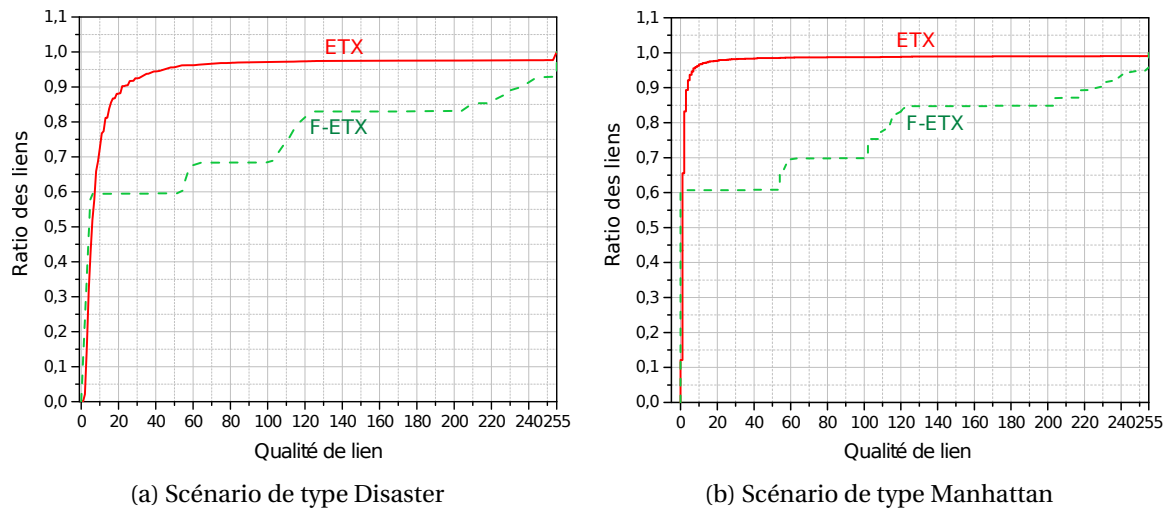


FIGURE 5.8 – CDFs empiriques de ETX et F-ETX

5.3.5 Bilan & Discussion

Nous avons montré avec les analyses temporelles que F-ETX est plus réactif que ETX. En utilisant les analyses statistiques nous avons observé que les estimations faites par F-ETX sont plus

4. La qualité d'un lien étant codée sur 8 bits les estimations sont comprises entre [0 : 255]

fiables et plus précises que celles faites par l'estimateur ETX. Néanmoins, la consommation énergétique des deux estimateurs est équivalente puisqu'ils reposent tous deux sur l'envoi périodique de paquets de sonde.

La figure 5.9 montre qu'une estimation de la qualité seule est insuffisante pour déterminer l'état du lien. On observe entre les instants 17 et 20 secondes que les qualités des liens estimées (représentées par un point) s'entrelacent ce qui conduit pour un protocole à sélectionner de manière successive un lien différent. Toutefois, les qualités estimées possèdent des tendances contraires (représentées par les deux flèches). Tandis que la qualité du lien 1 décroît, celle du lien 2 augmente. Une simple comparaison des valeurs instantanées de la qualité de lien est donc insuffisante pour évaluer l'état du lien. Pour résoudre ce problème, l'estimateur F-ETX a été étendu par des estimateurs compagnons dont l'objectif est de donner des informations complémentaires sur l'état du lien. Ces estimateurs font l'objet de la prochaine section.

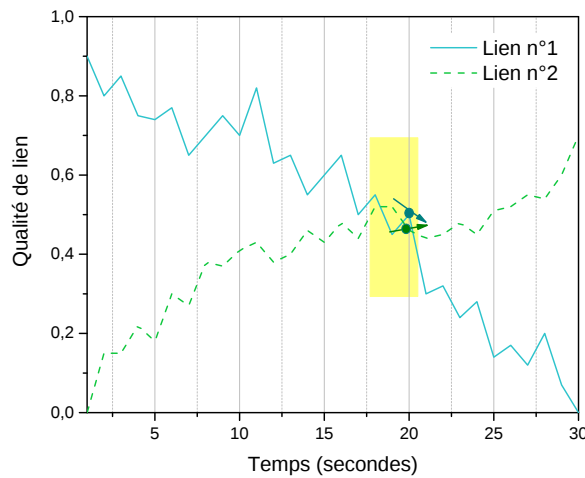


FIGURE 5.9 – Estimation à court terme vs. Tendance

5.4 Les estimateurs compagnons

L'estimateur de qualité n'effectue qu'une évaluation de qualité à court terme et que nous avons montré être insuffisante pour comparer deux qualités de liens. Pour obtenir une vision précise de l'état d'un lien, il est nécessaire d'évaluer d'autres caractéristiques. Par exemple, lorsque la détermination de la qualité d'un lien donne une vision instantanée, la tendance de qualité d'un lien donne une information à plus long terme et permet de compléter l'estimation instantanée. La taille de la fenêtre utilisée pour construire l'historique donne pour sa part une information sur la stabilité du lien. Enfin, un lien est déclaré unidirectionnel lorsque la probabilité d_f est nulle, mais il est possible d'anticiper cet état en observant la variation de réception de paquets pour les deux sens du lien. Nous décidons d'étendre F-ETX avec trois estimateurs additionnels que nous décrivons ci-dessous (l'estimation de la qualité est également donnée pour rappel).

5.4.1 Présentation des estimateurs

Cette section décrit les estimateurs additionnels utilisés par F-ETX. La métrique en possède donc quatre qui estiment : (i) la qualité de lien, (ii) la tendance de la qualité, (iii) la stabilité et (iv) l'éventuel état unidirectionnel d'un lien.

Estimateur de qualité de lien : cet estimateur est celui présenté dans la section précédente, basé sur les ratios d_f et d_r et calculé selon l'équation 5.7 :

$$\chi^{LQ} = \frac{1}{(1 - d_f)(1 - d_r)}. \quad (5.7)$$

Estimateur de la tendance de la qualité d'un lien : cet indicateur donne la tendance de la qualité d'un lien en quantifiant les variations entre l'estimation courante de la qualité de lien, χ_t^{IQ} et l'estimation précédente χ_{t-1}^{IQ} . L'estimation de la tendance utilise une moyenne mobile exponentielle afin de fournir une estimation à long terme :

$$\begin{aligned}\Delta_t^{IQ} &= \chi_t^{IQ} - \chi_{t-1}^{IQ}, \\ \chi_t^{Trend} &= \beta \cdot \Delta_t^{IQ} + (1 - \beta) \cdot \chi_{t-1}^{Trend}.\end{aligned}\tag{5.8}$$

Le coefficient β influence la sensibilité du filtre EWMA. Le choix d'une valeur β faible permet d'obtenir une estimation à long terme.

Estimateur de la stabilité d'un lien : Les fenêtres maintenues pour les ratios d_f et d_r fournissent une information sur la stabilité d'un lien. Soit un état binaire $\{0, 1\}$ qui représente l'état de réception d'un paquet dans la fenêtre. On note $|F_{max}|$ la taille maximale de la fenêtre F , $|F_n|$ la taille de la fenêtre à l'instant n et F_i le $i^{ème}$ élément de la fenêtre. Les fenêtres maintenues pour calculer les ratios d_f et d_r sont respectivement notées F^{d_f} and F^{d_r} . L'indicateur de stabilité est calculé en appliquant le filtre EWMA sur la stabilité absolue Ξ et relative ξ du lien :

$$\begin{aligned}\Xi &= \frac{\sum_{i=1}^{|F_n^{d_f}|} F_i^{d_f} + \sum_{i=1}^{|F_n^{d_r}|} F_i^{d_r}}{2|F_{max}|}, \\ \xi &= \frac{\sum_{i=1}^{|F_n^{d_f}|} F_i^{d_f} + \sum_{i=1}^{|F_n^{d_r}|} F_i^{d_r}}{|F_n^{d_f}| + |F_n^{d_r}|}, \\ \chi_t^{Stab} &= \Xi_t \cdot \gamma + (1 - \gamma) \cdot \xi_t.\end{aligned}\tag{5.9}$$

L'estimation de stabilité absolue (Ξ) est calculée à partir de la fenêtre maximale (valeur fixe) et donc représente le niveau absolu de stabilité d'un lien. L'estimation relative (ξ) est calculée à partir de la taille de la fenêtre courante et donne une information supplémentaire puisqu'elle prend en compte la taille de la fenêtre courante.

Estimateur de liens unidirectionnels : Ce dernier estimateur a pour objectif de détecter la capacité d'un lien symétrique à devenir asymétrique. Les approches traditionnelles comme l'estimateur ASL de la métrique F-LQE observent la variation du taux de réception entre le lien montant et le lien descendant. Or, ces méthodes s'avèrent inefficaces lorsqu'un lien a une courte durée de vie ou possède un fort taux de paquets perdus. Dans ce cas, les fenêtres ne contiennent pas assez de valeurs pour constituer un historique fiable. Nous proposons une alternative à ces méthodes qui se base sur la variation instantanée entre les taux de réception du lien montant et du lien descendant. Cette méthode permet de rester indépendant de la taille des fenêtres et de s'affranchir des limites des solutions précédentes. Soit F une fenêtre et $|F_n|$ sa taille à l'instant n . L'indicateur est donné ci-dessous :

$$\begin{aligned}\Delta^{Win} &= \sum_{i=1}^{|F_n|} F_i - \sum_{i=1}^{|F_{n-1}|} F_i, \\ \chi_t^{ULL} &= \chi_{t-1}^{ULL} \cdot \lambda + (1 - \lambda) \cdot \varphi(\Delta_t^{d_f}, \Delta_t^{d_r}), \\ \text{avec } \varphi(x, y) &= \begin{cases} -1 & x < 0 \wedge y > 0 \\ 1 & x > 0 \wedge y < 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}.\end{aligned}\tag{5.10}$$

Lorsque cet estimateur donne une valeur négative, le lien est considéré comme potentiellement unidirectionnel.

5.4.2 Évaluations

Dans cette section, nous évaluons les performances de l'ensemble des estimateurs décrits dans ce chapitre. Afin d'évaluer la fiabilité de chacun, nous comparons leurs performances avec les techniques multi-estimateurs existantes à savoir F-LQE [BKY⁺10] et HoPs [REWT11]. Les scénarios simulés sont identiques à ceux utilisés précédemment.

L'estimateur F-LQE se base sur quatre estimateurs. Le premier est calculé à partir du taux de paquets reçus et utilise le filtre WMEWMA pour estimer la qualité du lien. Le second détermine la stabilité du lien en calculant le coefficient de variation du taux de paquets reçus. Le troisième détermine si un lien est unidirectionnel ou bidirectionnel en observant les taux de paquets reçus du lien montant et du lien descendant. Enfin, le dernier estimateur détermine la qualité du canal de communication en se basant sur une estimation du SNR. Parce que cette information est obtenue uniquement à partir de la couche physique, ce dernier estimateur n'est pas un estimateur logique et ne rentre donc pas dans le cadre d'étude de cette thèse.

HoPS se base lui aussi sur quatre estimateurs. Le premier mesure la qualité du lien à court terme en se basant sur le filtre EWMA. Le second mesure la tendance de la qualité en moyennant l'estimation à court terme. Le troisième estimateur mesure la déviation entre les estimation à court et à long terme afin d'estimer la stabilité du lien. Enfin, le dernier indique la tendance de la qualité du lien. Le détail des calculs de chaque estimateur associé à F-LQE et HoPS est donné en annexe B page 183.

Notre évaluation porte à la fois sur une étude temporelle d'un lien à travers l'observation du comportement des estimateurs sur un lien du réseau et sur une étude statistique des estimateurs.

Analyses temporelles

Les analyses temporelles s'effectuent à partir des estimations fournies par les estimateurs. Deux cas d'étude sont proposés : le premier est celui d'une durée de lien faible et fortement perturbé (scénario Manhattan) ce qui permet d'observer la réactivité des estimateurs. Le second est celui d'une durée de vie de lien plus longue (scénario Disaster) et montre comment les estimateurs se stabilisent.

Premier scénario. La figure 5.10 montre les valeurs des différents estimateurs. La figure 5.10 (a) montre à la fois une estimation de la qualité basée sur le PRR et les valeurs de l'état de réception des paquets utilisées pour calculer les ratios d_f et d_r . On observe que dans un premier temps le lien est unidirectionnel (d_r a une valeur nulle) puis devient bidirectionnel pour enfin se rompre à 11s. L'observation de l'état des paquets utilisés pour calculer d_f et d_r nous indique que la durée de vie du lien est de 4s. On remarque que l'estimation basée sur le taux de paquets reçus souffre d'un temps de latence important ce qui est dû à l'utilisation d'une fenêtre statique pour gérer l'historique de réception. De plus, en étant basée uniquement sur l'état de réception des paquets utilisés pour déterminer le ratio d_r , l'estimation ne prend pas en compte les pertes du lien montant.

Les estimations relatives à F-LQE sont représentées en figures 5.10 (b) et (c). L'estimateur de qualité SPRR suit le même comportement que l'estimation basée sur PRR mais de manière plus lisse. Cela est dû à l'utilisation du filtre WMEWMA qui moyenne chaque nouvelle valeur avec les anciennes et par conséquent lisse l'estimation. L'indicateur de stabilité (SF) qui est basé sur le coefficient de variation des 5 derniers PRR indique une variation lorsque le lien est rompu mais ne permet pas de déterminer instantanément la disparition d'un lien. Enfin, l'estimateur de liens unidirectionnels (ASL) indique la présence d'un lien unidirectionnel à 10s, cependant cet état n'est dû qu'à une qualité de lien instable qui tend à fausser son estimation.

Les estimations relatives à HoPS sont présentées dans les figures 5.10 (d) et (e). En examinant l'estimation à court terme (HoPS ST) on remarque que la courbe est plus lisse. Ce comportement s'explique par l'utilisation de la moyenne exponentielle sur l'état de réception des données ce qui limite la réactivité de l'estimateur. En parallèle, l'estimateur à long terme varie peu et indique par conséquent un faible changement de qualité du lien. Les estimateurs concernant la stabilité et la

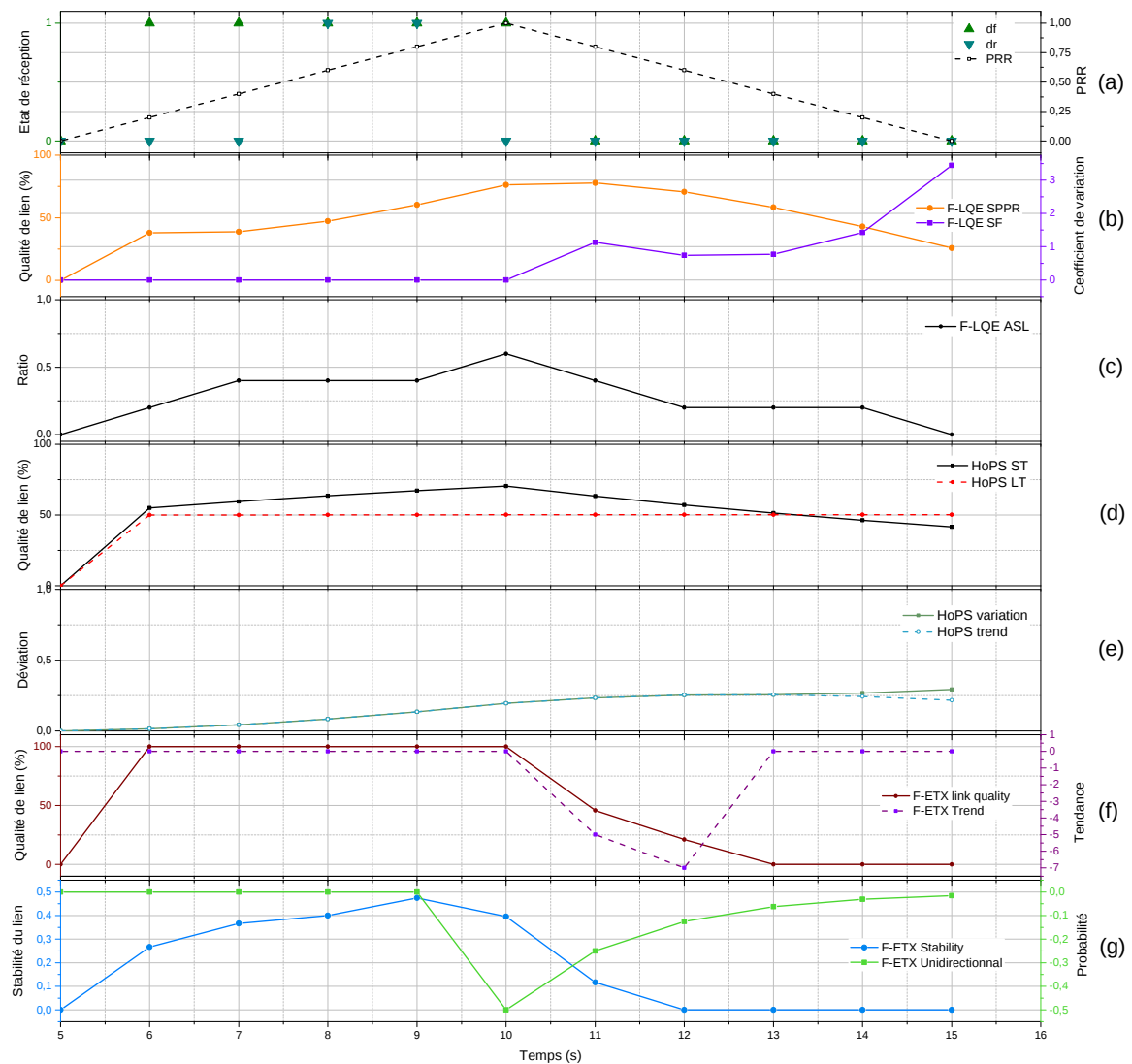


FIGURE 5.10 – Analyse qualitative du scénario Manhattan

tendance de la qualité de lien indiquent une amélioration de la qualité du lien, mais étant basés sur les estimations à court et à long terme ces estimateurs souffrent d'une latence importante.

Enfin, les figures 5.10 (f) et (g) représentent les estimations données par les estimateurs compagnons de F-ETX. L'estimateur de qualité indique que le lien possède une qualité maximale au début du scénario puis met en évidence la coupure de ce lien à 13s. Ce comportement s'explique par le fait que dès le départ le ratio d_r est à nul, l'estimateur évalue uniquement la qualité du lien descendant. L'estimateur de tendance indique bien une tendance constante du lien puis une baisse. L'estimateur de stabilité quant à lui anticipe la perte du lien par rapport à l'estimateur de qualité. Concernant le détecteur de lien unidirectionnel, il ne déclare pas le lien comme unidirectionnel au début du scénario puisque la fenêtre pour calculer le ratio d_f est vide. Néanmoins, il détecte bien la phase transitoire de lien unidirectionnel à 10s.

Second scénario. La figure 5.11 montre le résultat des estimateurs dans le second scénario. La figure 5.11 (a) montre que la durée de vie du lien est de 19s (de 4s à 23s). On peut observer qu'il y a des pertes de liens transitoires notamment durant les intervalles de temps, [14s, 15s] et [17s, 18s].

Les figures 5.11 (b) et (c) montrent les résultats des estimateurs de F-LQE. On remarque que l'estimateur SPPR suit les mêmes variations que le PPR (fig 5.11 (a)), néanmoins, il détecte peu les coupures de liens temporaires. L'estimateur de stabilité (SF) indique quant à lui une instabilité du lien à partir de 13s. De son côté, le détecteur de lien unidirectionnel déclare de courtes phases

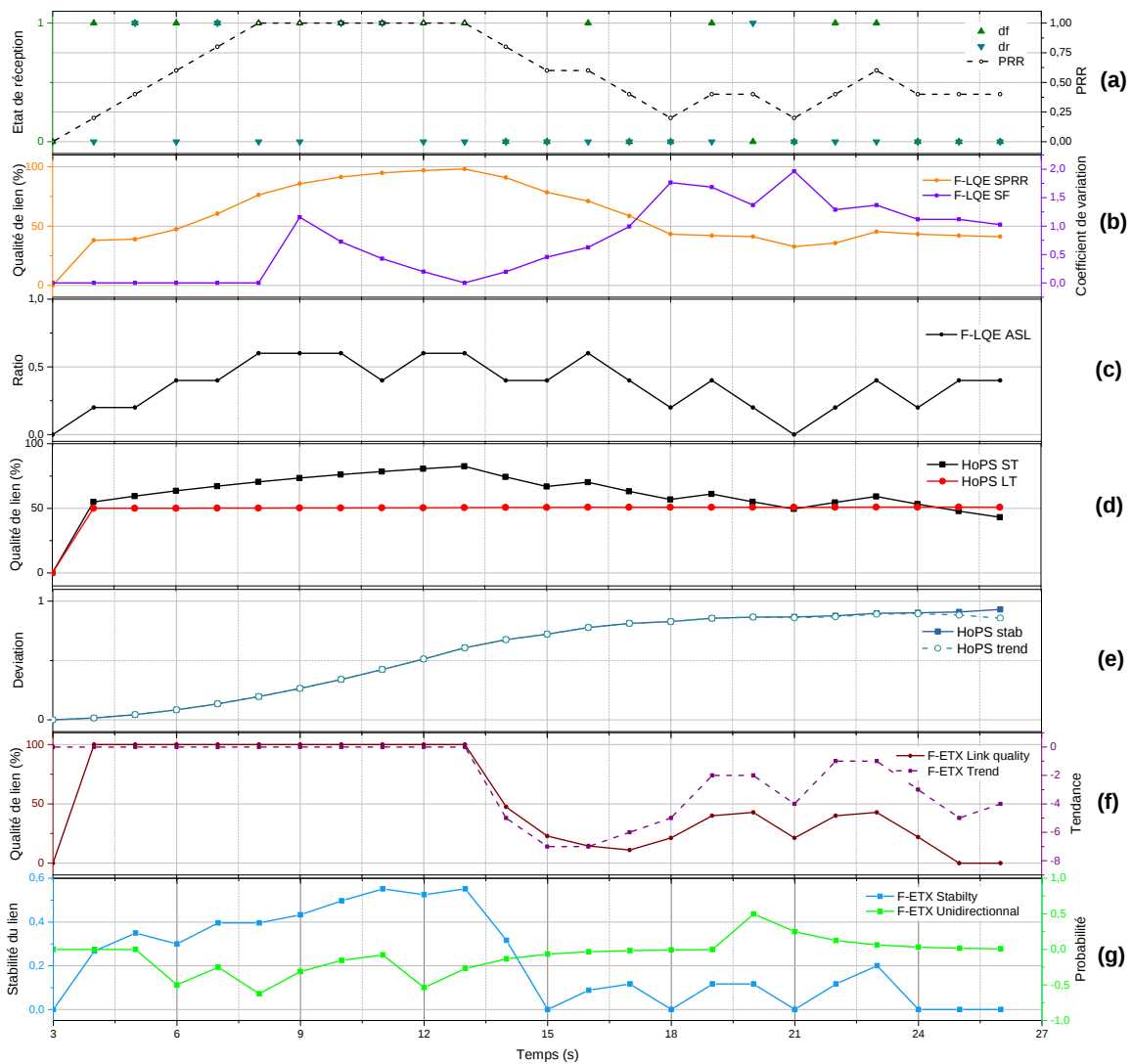


FIGURE 5.11 – Analyse qualitative du scénario Disaster

unidirectionnelles car son estimation est fortement perturbée par les pertes transitoires du lien.

Les estimateurs de qualité de HoPS, figure 5.11 (d), souffrent d'une faible réactivité puisqu'ils varient faiblement. On remarque également que les estimateurs de tendance et de stabilité, dont les valeurs sont présentées dans la figure 5.11 (e), indiquent que la qualité du lien augmente et tend à se stabiliser. Ces estimateurs détectent toutefois une baisse de la stabilité lorsque le lien est rompu.

L'estimateur de qualité (fig. 5.11 (f)) de F-ETX arrive à caractériser la perte de qualité du lien à partir de 13s. On remarque que les coupures transitoires du lien sont fortement pénalisées par l'estimateur de qualité. Cette évolution est confirmée par l'estimateur de tendance qui décrit une baisse de la qualité du lien. L'estimateur de stabilité fig. 5.11 (g) évalue lui aussi une faible stabilité du lien et arrive à détecter les phases transitoires de perte de lien. Enfin, l'estimateur de lien unidirectionnel caractérise les phases transitoires et contrairement à l'estimateur ASL de F-LQE, est moins perturbé par les pertes stochastiques.

Analyses statistiques

Nous complétons notre étude par une analyse statistique sur tous les liens présents dans les deux scénarios. Cette étude se présente en deux parties. La première étudie le temps d'anticipation de rupture de lien entre l'estimation faite par l'estimateur de qualité de F-ETX et l'estimateur de type PRR. La seconde étudie la capacité de prédiction des estimateurs en calculant la moyenne

absolue des erreurs (MAE) entre les estimation prédites et effectuées (plus cette valeur est grande moins la prédiction est précise). Les résultats pour les deux scénarios sont montrés en figure 5.12

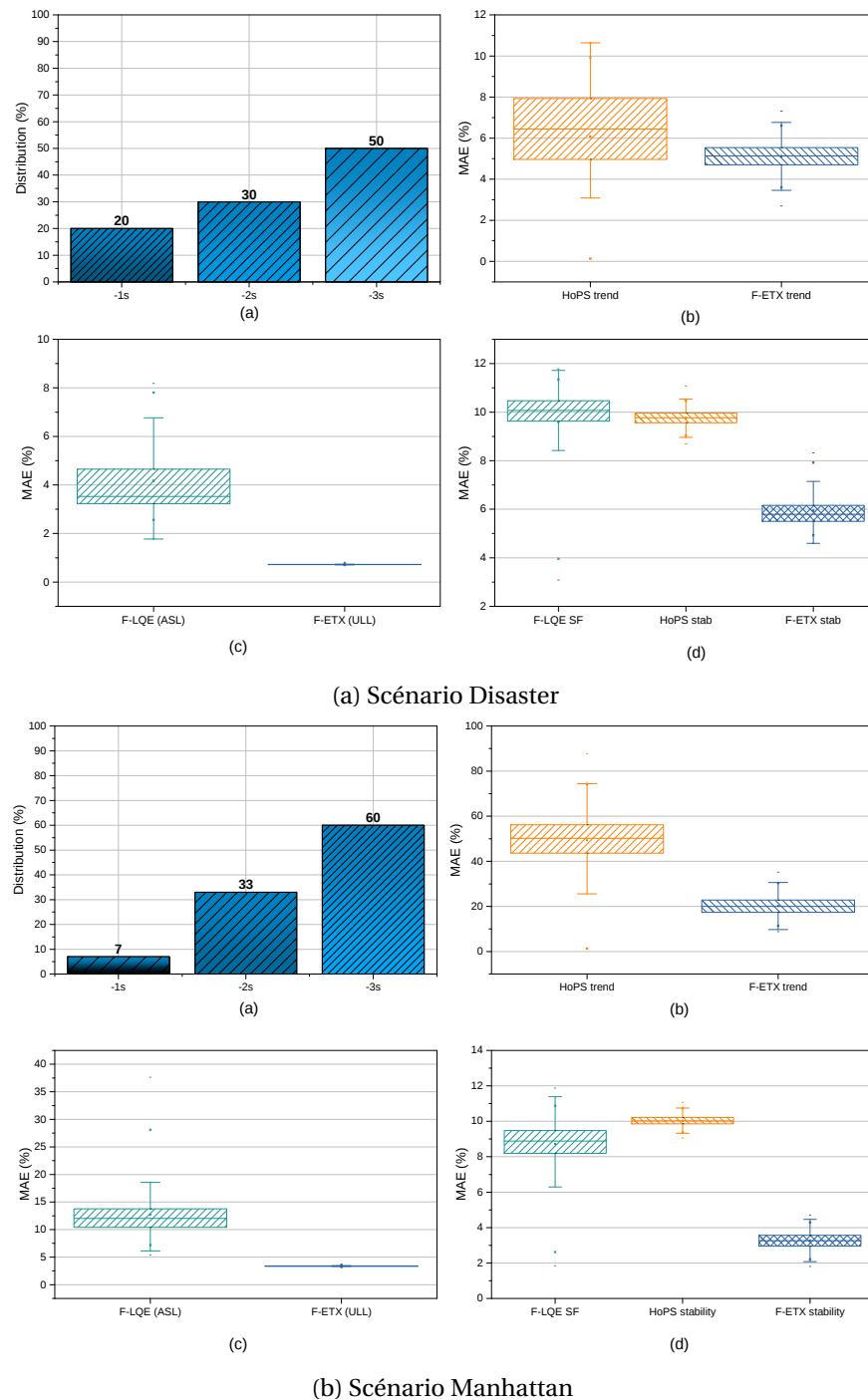


FIGURE 5.12 – Analyse statistiques des liens

On peut observer à partir des figures 5.12b (a) et 5.12a (a) que l'estimateur de qualité de F-ETX anticipe mieux la perte d'un lien qu'un estimateur basé sur le PRR en détectant principalement une coupure trois secondes auparavant. Concernant les estimations de la tendance (fig. 5.12b (b) et 5.12a (b)), de la détection des liens unidirectionnels (fig. 5.12b (c) et 5.12a (c)) et de la stabilité (fig. 5.12b (d) et 5.12a (d)) on remarque que les estimateurs compagnons de F-ETX prédisent plus précisément la propriété du lien évaluée, comparés aux estimateurs de F-LQE et de HoPS. Enfin, on observe que les prédictions fournies par les estimateurs de F-ETX sont plus précises, puisque l'écart type des valeurs fournies est plus faible que les autres estimateurs.

5.4.3 Discussion

La métrique F-ETX caractérise donc la qualité d'un lien, sa tendance, sa stabilité ainsi que sa capacité à devenir asymétrique. Ces estimations permettent d'obtenir une vision multi-facette du lien afin de mieux déterminer son état. Les résultats des analyses temporelles et statistiques montrent que les estimateurs sont précis en dépit de la mobilité des nœuds. Une question reste néanmoins en suspend concernant l'intégration de la métrique dans les protocoles. Il n'existe pas de méthodes standards et les solutions présentes dans la littérature regroupent ces estimateurs dans une seule métrique afin de la rendre portable pour les différents protocoles. Nous avons choisi une autre solution en intégrant chacun des estimateurs dans le protocole et que nous décrivons dans le chapitre 7.

5.5 Conclusion

Ce chapitre a abordé la première contribution de cette thèse qui concerne l'évaluation de la qualité de lien dans les réseaux sans fil. La métrique proposée, F-ETX, se base sur l'utilisation d'une fenêtre dynamique pour surveiller les paquets perdus et réceptionnés. Cette approche permet de caractériser à la fois la qualité du lien montant et du lien descendant. L'utilisation d'une fenêtre dynamique permet d'avoir une estimation réactive dont la précision est ajustée en fonction de la stabilité du lien. Néanmoins, une interprétation directe de la qualité d'un lien est insuffisante pour pouvoir la comparer avec celle d'un autre lien, puisque ces deux valeurs ne sont que des valeurs instantanées. Cette limite justifie l'introduction d'estimateurs compagnons qui apportent des informations supplémentaires. F-ETX devient alors une métrique d'évaluation d'état du lien. Cette multi-estimation permet à la métrique d'être prédictive en anticipant la dégradation de la qualité d'un lien, voir sa disparition.

Chapitre 6

Protocole de routage DTN pour les réseaux acoustiques sous-marins mobiles

« One cannot escape the feeling that these mathematical formulas have an independent existence and an intelligence of their own, that they are wiser than we are, wiser even than their discoverers... »

Heinrich Hertz

Sommaire

6.1 Introduction	107
6.2 Contexte	108
6.2.1 Interface de communication acoustique : le micro-modem WHOI	108
6.2.2 Enjeux dans les réseaux mobiles sous-marins	109
6.3 Techniques d'apprentissage par renforcement	110
6.3.1 Principe	110
6.3.2 L'algorithme Q-learning	112
6.4 Conception du protocole de routage	113
6.4.1 Métriques d'occurrences de rencontre	114
6.4.2 Algorithme de routage développé	116
6.4.3 Gestion des paquets	117
6.4.4 Les messages de routage	119
6.5 Simulation et évaluation de performance	120
6.5.1 Caractérisation des communications acoustiques	121
6.5.2 Performance du protocole ROGUE	121
6.5.3 Consommation Énergétique	122
6.6 Conclusion	124

6.1 Introduction

La transmission de signaux acoustiques est actuellement la technique la plus utilisée par les systèmes de communication sous-marins. Toutefois, le signal acoustique possède une faible célé-

rité dans l'eau ce qui engendre un délai d'acheminement significatif et n'offre qu'une faible bande passante disponible. Dans les réseaux sous-marins, la consommation énergétique est un élément capital puisque la transmission des données requiert une énergie importante, comme nous le montrons dans la section 6.2.1 ; or les nœuds possèdent une batterie à la capacité limitée.

Les protocoles de routage doivent prendre en compte les caractéristiques spécifiques du milieu sous-marin afin d'être performants en termes de paquets délivrés et de délai d'acheminement. Ils doivent également minimiser le nombre de messages de routage transmis afin de réduire la consommation d'énergie des nœuds. La majorité d'entre eux ont été conçus pour les réseaux de capteurs et reposent sur une architecture de communication hiérarchique qui distingue les engins sous-marins de ceux situés en surface. L'objectif de ces protocoles est d'acheminer les données entre les véhicules sous-marins et ceux situés en surface de la manière la plus efficace possible. La topologie de ces réseaux peut être statique ou dynamique, en fonction de la vitesse des nœuds qui peuvent être transportés par le courant marin, laquelle peut atteindre 3 m.s^{-1} [ABAF11].

Les caractéristiques des réseaux de capteurs ne sont pas transposables aux réseaux mobiles sous-marins. Les véhicules marins tels que le REMUS ou le Seaglider, par exemple sont auto-propulsés et possèdent donc des vitesses propres qui sont respectivement de 1.54333 m.s^{-1} [Ins14] et de 0.25 m.s^{-1} [EOL⁺01]. Les informations de localisation utilisées par les engins ne sont pas toujours homogènes, ce qui est un obstacle pour la coopération entre engins différents. Il est également préférable dans les réseaux mobiles d'utiliser une architecture décentralisée, puisqu'elle est tolérante aux pannes et aux coupures de liens et permet la répartition de la charge sur l'ensemble des véhicules disponibles. Dans ce chapitre nous détaillons une version du protocole de routage, ROuTInG protocol for Unmanned systEm (ROGUE), conçu pour les réseaux mobiles sous-marins, basé sur un algorithme d'apprentissage automatique, une gestion de priorité et un mécanisme de duplication des paquets afin d'acheminer efficacement les données tout en réduisant le nombre de transmissions, avec pour conséquence la réduction de la consommation d'énergie.

Ce chapitre est divisé en cinq parties. La première partie présente le contexte et les motivations qui nous ont amenés à développer le protocole que nous proposons. La seconde introduit les techniques d'apprentissage par renforcement et décrit l'algorithme de type Q-learning. La troisième décrit notre algorithme de routage et les mécanismes associés. La dernière partie quant à elle présente les résultats obtenus à partir d'un scénario de simulation réaliste.

6.2 Contexte

Dans cette section nous présentons le contexte et les enjeux associés aux réseaux sous-marins. Nous détaillons dans un premier temps les caractéristiques du micro-modem WHOI [FGS⁺05] qui est l'interface la plus utilisée par les systèmes sous-marins. Ceci nous permet d'étudier les performances de transmission de ce micro-modem et de les comparer à celles d'une interface Wi-Fi. Nous décrivons ensuite les problématiques associées aux protocoles de routage dans les réseaux sous-marins mobiles.

6.2.1 Interface de communication acoustique : le micro-modem WHOI

Bien qu'aucune norme n'ait été définie pour standardiser les modems acoustiques, la popularité du micro-modem WHOI en fait une référence. Ce modem peut être utilisé pour la communication et la navigation dans les milieux petits et grands fonds. Par défaut, il utilise une modulation de type Frequency Shift Keying (FSK) [FGS⁺05] avec une méthode de saut de fréquences, toutefois il peut également utiliser une modulation de type Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK) [FGS⁺05]. Le modem opère à une fréquence allant de 3 à 30 kHz avec une bande passante qui n'excède pas 5 kHz. Les trames transmises peuvent être classées en deux types : (i) les mini-paquets qui peuvent contenir jusqu'à 21 bits de données et (ii) les paquets de plus grande taille, comme nous le décrivons dans le tableau 6.1. On remarque dans le tableau 6.2 que la consommation énergétique du micro-modem lors de la phase de transmission des données est largement supérieure à celle

d'une interface Wi-Fi.

TABLEAU 6.1 – Débit de transmission du micro-modem

Modulation	Bit par MPDU	Max MPDU	Taille maximale des paquets	Débit (bps) à 5kHz de bande passante
FH-FSK	32	1	32	80
QPSK	64	3	192	498
QPSK	256	2	512	1301
QPSK	256	8	2048	5388

TABLEAU 6.2 – Comparaison de la consommation énergétique du micromodem WHOI et d'une interface Wi-Fi

Modèles	WHOI micro Modem [GPV ⁺ 10]	Intel PRO Wireless 2100 miniPCI Card [CIB11]
<i>Transmission</i>	8W-48W (dépend de la fréquence et de la puissance d'émission)	1914 mW
<i>Réception</i>	158mW + consommation du coprocesseur	1386 mW
<i>Active (aucune action)</i>	158 mW	294 mW
<i>Inactive</i>	< 220 μ W	128 mW

6.2.2 Enjeux dans les réseaux mobiles sous-marins

Bien que dans les réseaux de capteurs les nœuds puissent être mobiles, leurs déplacements sont essentiellement la conséquence des courants marins. On distingue deux types de nœuds : (i) les capteurs qui effectuent une surveillance et transmettent les informations aux (ii) nœuds en surface qui se chargent de collecter les données. Le trafic véhiculé dans ces réseaux est toujours dans le sens des capteurs vers les nœuds en surface. Toutefois, ces réseaux ne peuvent être utilisés dans le cadre de notre mission de déminage. Tout d'abord, la mobilité des nœuds considérés est seulement la conséquence des courants marins, ce qui ne permet pas de garantir l'exploration complète d'une zone définie. Les véhicules considérés pour la mission définie dans cette thèse incluent le REMUS ou encore le Seaglider qui sont auto-propulsés et se déplacent respectivement à $1,54333 \text{ m.s}^{-1}$ [Ins14] et 0.25 m.s^{-1} [EOL⁺01]. Ensuite, le réseau doit pouvoir supporter la perte de nœuds ainsi que la coupure de liens de communication. Enfin, chaque type d'engin utilisant une information de localisation différente pour le routage des données, il est difficile de déployer un protocole de routage unique dans ces réseaux.

Nous considérons également que les réseaux sous-marins présentent une faible connectivité de par la faible densité des nœuds, qui plus est évoluent dans une très large zone. Par conséquent, les techniques de routage tolérantes aux délais (DTN) sont les plus adaptées à ces réseaux. Hu et Fet [HF13] proposent un protocole de routage qui utilise une technique d'apprentissage par renforcement appelée Q-learning et un algorithme de prédiction de contacts entre les nœuds. La prédiction est réalisée par un filtre de moindres gradient stochastique (Last Means Square) qui permet d'estimer les futurs occurrences de contact entre les nœuds. Ces estimations sont ensuite utilisées par l'algorithme de routage pour déterminer si un message doit être transmis ou bien conservé lorsque deux nœuds se rencontrent. L'utilisation de l'algorithme Q-learning permet de

trouver une stratégie sous-optimale afin de transmettre les paquets le plus rapidement possible tout en minimisant le nombre de transmissions.

Bien que ce protocole présente de bonnes performances dans les réseaux de capteurs, il n'a pas été conçu pour les réseaux mobiles dans lesquels les nœuds se déplacent librement et où les occurrences de rencontre ne peuvent pas être prédites précisément. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces caractéristiques dans le protocole de routage que nous concevons, afin d'offrir un service d'acheminement des données efficace. De ce fait, nous proposons un protocole de routage basé sur l'algorithme Q-learning qui associé à des mécanismes de traitement et duplication des paquets permet d'être utilisé dans les réseaux sous-marins mobiles que nous considérons. Notre protocole ne reposant sur aucune hypothèse concernant la localisation des engins, et il peut être utilisé par n'importe quel engin.

6.3 Techniques d'apprentissage par renforcement

Il est difficile d'adopter une stratégie de routage efficace dans un environnement dynamique et inconnu. Les méthodes d'apprentissage par renforcement sont particulièrement efficaces pour ce type de problème. L'idée consiste à considérer un agent autonome qui prend des décisions en fonction de son état. La conséquence de cette décision produit soit une récompense, soit une pénalité. Dans cette section, nous décrivons les techniques d'apprentissage par renforcement et leurs applications dans le domaine du routage. La première partie introduit les concepts des techniques d'apprentissage par renforcement. La seconde partie décrit l'algorithme Q-Learning et définit les fonctions de récompense qui valorisent ou pénalisent les actions effectuées.

6.3.1 Principe

L'apprentissage par renforcement permet à un agent d'apprendre un comportement en fonction d'une situation. On associe à une situation une action à effectuer de sorte à ce que chaque décision prise soit sanctionnée ou récompensée, ce qui permet de déterminer la meilleure stratégie [SB98]. À l'origine, l'agent n'ayant aucune expérience, il ne sait pas quelle action effectuer lorsqu'une situation survient. Il doit alors découvrir quelles sont les actions qui sont les mieux récompensées afin d'accumuler le plus de récompenses possible. L'un des principaux challenges est le compromis que doit faire l'agent entre exploration et exploitation. Pour maximiser les récompenses l'agent doit pouvoir choisir des actions non effectuées auparavant, autrement dit l'agent doit explorer le système. Cette situation engendre donc un dilemme entre l'exploration du système et l'exploitation des connaissances, ce qui influence la solution trouvée qui peut être optimale ou non.

On distingue dans les techniques d'apprentissage par renforcement l'agent qui apprend et prend des décisions et l'environnement avec lequel il interagit. Cette interaction illustrée dans la figure 6.1 montre qu'un agent sélectionne une action à effectuer en fonction de l'environnement.

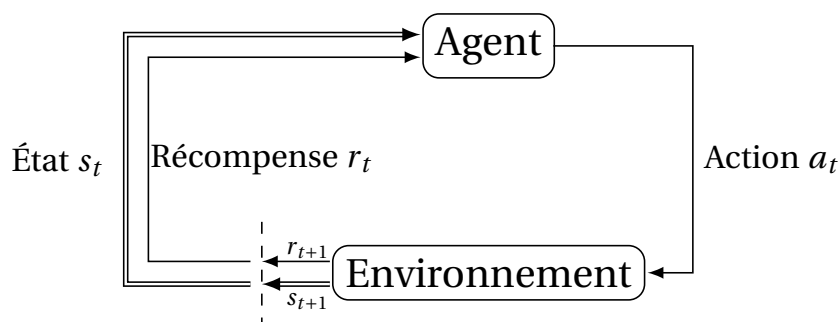


FIGURE 6.1 – Principe de l'apprentissage par renforcement

Une technique d'apprentissage satisfaisant la propriété de Markov est appelée Processus de Décision Markovien (MDP). Formellement un MDP est décrit par un tuple $\langle S, A, P, R \rangle$. A chaque pas de temps et dans un environnement dynamique représenté par une probabilité de distribution, Pr , le système se trouve dans l'état $s \in S$, l'agent effectuant une action $a \in A$, qui a pour conséquence une transition vers l'état s' selon la fonction de transition $P_{s,s'}^a$, donnée par l'équation suivante :

$$P_{s,s'}^a = Pr \{s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a\} \\ \text{où } \sum_{s' \in S} P_{ss'}^a = 1. \quad (6.1)$$

Lorsqu'une action est effectuée, la récompense $R_{s,s'}^a$ attendue, E , est donnée par la récompense r sachant l'état et l'action effectuée :

$$R_{s,s'}^a = E \{r_{t+1} | s_t = s, a_t = a, s_{t+1} = s'\}. \quad (6.2)$$

D'une manière générale à partir d'un état $s \in S$, l'ensemble des probabilités de transition peut être caractérisé par une matrice, comme donnée ci-dessous pour l'état s_1 :

$$P(s_1) = \begin{matrix} & \begin{matrix} s_1 & s_2 & \dots & s_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} P_{s_1,s_1}^{a_1} & P_{s_1,s_2}^{a_1} & \dots & P_{s_1,s_n}^{a_1} \\ P_{s_1,s_1}^{a_2} & P_{s_1,s_2}^{a_2} & \dots & P_{s_1,s_n}^{a_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{s_1,s_1}^{a_n} & P_{s_1,s_2}^{a_n} & \dots & P_{s_1,s_n}^{a_n} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

La fonction R permet de récompenser ou de pénaliser l'agent en fonction des actions choisies. Le comportement de l'agent est défini selon une politique π qui est une fonction des états vers des actions. Cette politique peut être une simple fonction, une information recherchée (par exemple dans une base de données ou dans une table de routage) ou bien le résultat d'un calcul. Il est important de définir correctement cette politique de façon à optimiser la fonction d'utilité. Cette fonction peut se calculer comme la somme des récompenses obtenues ou encore la récompense moyenne obtenue à chaque transition. Une politique π permet d'associer une probabilité $\pi(s, a)$ à chaque état, $s \in S$ et chaque action $a \in A(s)$. La valeur d'un état s associée à une politique π , notée $V^\pi(s)$ est définie comme la valeur totale des récompenses, R_t pouvant être obtenues par un agent suivant π . Dans un MDP, la fonction $V^\pi(s)$ se définit comme :

$$V^\pi(s) = E_\pi \{R_t | s_t = s\} = E_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s \right\}. \quad (6.3)$$

Avec E_π la valeur espérée selon la politique π et γ le facteur qui détermine l'importance donnée aux futures récompenses, tel que $0 \leq \gamma \leq 1$. Si $\gamma = 0$, le système considère seulement la valeur de la récompense la plus récente, mais ne permet pas forcément de trouver la solution optimale. Si $\gamma = 1$, le système s'efforce de trouver les meilleures récompenses. Néanmoins, il est impossible de prédire précisément la future valeur de la récompense ce qui ne permet donc pas de garantir les futures performances du système. Pour assurer un compromis de performance entre l'exploration et l'exploitation du système par un agent le paramètre γ doit être compris dans l'intervalle $[0.5, 0.99]$. En utilisant l'équation précédente, il est possible de déterminer à partir d'une action a , d'un agent dans un état s utilisant une politique π , la valeur totale des récompenses obtenues notée $Q^\pi(s, a)$ aussi appelée la fonction de valeur d'action pour une politique π :

$$Q^\pi(s, a) = E_\pi \{R_t | s_t = s, a_t = a\} = E_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a \right\}. \quad (6.4)$$

On peut également exprimer la relation entre la valeur d'un état s et la valeur de ces successeurs par l'équation de Bellman [SB98] :

$$\begin{aligned}
V^\pi(s) &= E_\pi \{R_t | s_t = s\}, \\
&= E_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s \right\}, \\
&= E_\pi \left\{ r_{t+1} + \gamma \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+2} | s_t = s \right\}.
\end{aligned} \tag{6.5}$$

La résolution d'un problème par une technique d'apprentissage par renforcement consiste à trouver la meilleure politique π de sorte que l'agent maximise ses récompenses. Une politique π est meilleure qu'une politique π' si sa fonction d'utilité est plus grande, telle que $V^\pi(s) > V^{\pi'}(s)$ pour tout $s \in S$. L'objectif est donc de trouver la politique optimale π^* permettant d'obtenir les meilleures récompenses notée $\max_{\pi} V^\pi(s) = V^*(s)$ qui est la fonction optimale valeur-état. De la même manière, la fonction optimale valeur-action Q^* est déterminée par $Q^*(s, a) = \max_{\pi} Q^\pi(s, a)$ pour tout $s \in S$ et $a \in A$. Pour une paire d'état-action (s, a) , la valeur optimale retournée dans une politique optimale π est donnée par :

$$Q^*(s, a) = E_\pi \{r_{t+1} + \gamma V^*(s_{t+1}) | s_t = s, a_t = a\}. \tag{6.6}$$

Si on reprend l'équation de Bellman et l'équation 6.5, la fonction $V^*(s)$ peut être déterminée par :

$$\begin{aligned}
V^*(s) &= \max_{a \in A} Q^{\pi^*}(s, a), \\
&= \max_a E_{\pi^*} \{R_t | s_t = s, a_t = a\}, \\
&= \max_a E_{\pi^*} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a \right\}, \\
&= \max_a E_{\pi^*} \left\{ r_{t+1} + \gamma \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+2} | s_t = s, a_t = a \right\}, \\
&= \max_a E \{r_{t+1} + \gamma V^*(s_{t+1}) | s_t = s, a_t = a\}, \\
&= \max_{a \in A} \sum_{s'} P_{ss'}^a [R_{ss'}^a + \gamma V^*(s')].
\end{aligned} \tag{6.7}$$

De manière théorique, cette équation permettrait de résoudre le système de manière optimale. Il est toutefois impossible de connaître la politique optimale au début d'un scénario. Par conséquent, les algorithmes d'apprentissage par renforcement s'efforcent de chercher cette politique. Il existe deux algorithmes majeurs, le TD-learning et le Q-learning. Le premier algorithme a pour objectif d'apprendre la fonction d'utilité liée aux états et le second la fonction d'utilité liée aux actions. C'est cette deuxième fonction qui nous intéresse puisque nous cherchons à choisir l'action que doit effectuer le protocole de routage en fonction des nœuds rencontrés.

6.3.2 L'algorithme Q-learning

L'algorithme de Q-learning est une technique d'apprentissage qui détermine l'utilité optimale de chaque couple (s, a) par le biais d'une fonction Q . L'agent doit effectuer une action a qui permet de maximiser $Q(s, a)$, la fonction d'utilité de l'action a dans l'état s . Soit la valeur d'une action a dans un état s pour une politique π , $Q^\pi(s, a)$, telle que la valeur retournée après avoir pris l'action

a est donnée par l'équation 6.8 :

$$\begin{aligned}
Q^\pi &= (s, a) \\
&= E_\pi \{R_t | s_t = s, a_t = a\}, \\
&= E_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a \right\}, \\
&= E_\pi \left\{ r_t + \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a \right\}, \\
&= \max_a \left[r_t + \gamma \sum_{s_{t+1} \in S} P_{s_t s_{t+1}}^a V^*(s_{t+1}) | s_t = s, a_t = a \right].
\end{aligned} \tag{6.8}$$

À partir des équations 6.7 et 6.8 on obtient la fonction d'utilité maximale donnée par :

$$V^*(s) = \max_{a \in A} Q^*(s, a). \tag{6.9}$$

L'algorithme satisfaisant la propriété de Markov est :

$$P(s_t | s_{t-1}, a_{t-1}) = P(s_t | s_{t-1}, a_{t-1}, s_{t-2}, a_{t-2}, \dots), \tag{6.10}$$

Alors la fonction d'utilité maximale lorsqu'un agent dans un état s_t effectue une action a_t est donnée par l'équation :

$$Q^*(s_t, a_t) = r_t + \gamma \sum_{s_{t+1} \in S} P_{s_t s_{t+1}}^{a_t} \max_a Q^*(s_{t+1}, a). \tag{6.11}$$

En pratique l'exploration du système par l'agent se fait de manière itérative, autrement dit la politique optimale est déterminée à chaque pas de décision et est donnée par l'équation :

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s_t, a_t) + \alpha[r_t + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a)]. \tag{6.12}$$

Le coefficient α , $0 \leq \alpha \leq 1$, représente le taux d'apprentissage de l'agent et influe sur le nombre de mises à jour des Q-valeurs. Enfin, l'algorithme Q-learning (algorithme 3) présente l'avantage de pouvoir être aisément implémenté.

Algorithme 3 Algorithme du Q-learning

- 1: Pour chaque couple s, a initialisé $Q(s, a)$ à zéro
 - 2: **repeat** pour chaque événement
 - 3: Choisir une action a à partir d'un état s en fonction de la stratégie (exploration ou exploitation)
 - 4: Effectuer a , observer r et s'
 - 5: $Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$
 - 6: $s \leftarrow s'$
 - 7: **until** s' est l'état terminal
-

6.4 Conception du protocole de routage

Dans cette section est décrit le protocole de routage DTN basé sur l'algorithme Q-learning que nous proposons. Il se base également sur des métriques qui évaluent les occurrences de rencontre avec les nœuds. Ces métriques sont utilisées dans l'algorithme de Q-learning pour calculer les récompenses associées aux actions de routage. La contrainte du délai d'acheminement des paquets est cruciale dans les réseaux DTN. Pour cela, notre protocole s'inspire des mécanismes de QoS afin de discriminer les paquets en fonction de leur date d'échéance. Cependant, ces mécanismes sont parfois insuffisants. Pour pallier ce problème, le protocole permet la répllication des données lorsque les dates d'échéance arrivent prochainement à terme. Le protocole dont le schéma est illustré en figure 6.2 est ainsi composé de quatre parties : (i) les métriques qui calculent les occurrences de rencontre, (ii) l'algorithme de routage basé sur le Q-learning, (iii) le processus de gestion des délais d'acheminement des paquets et (iv) le processus de répllication des données.

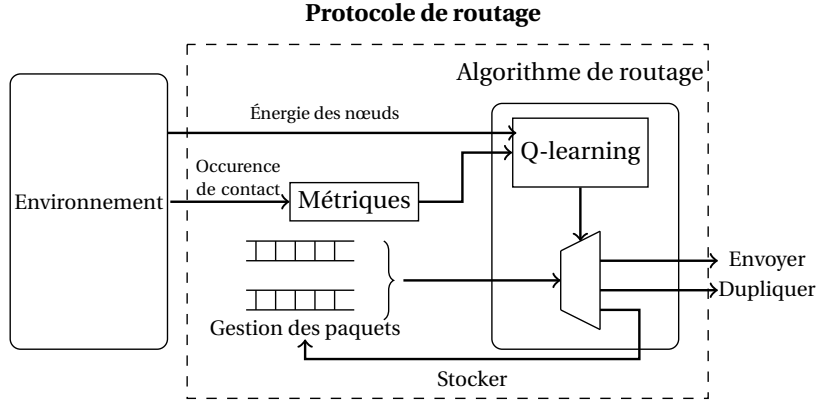


FIGURE 6.2 – Schéma de l'architecture du protocole de routage pour les réseaux sous-marins mobiles

6.4.1 Métriques d'occurrences de rencontre

Le calcul des occurrences entre les nœuds dans les protocoles de routage DTN permet de déterminer quel voisin rencontrera le plus rapidement possible le nœud destinataire. Deux approches peuvent être adoptées en fonction des hypothèses. Dans la première, on suppose qu'il existe une rencontre périodique et pré-établie des nœuds, dans ce cas tous les nœuds sont synchronisés afin de communiquer périodiquement. Dans la seconde, on considère les rencontres entre les nœuds comme opportunistes, c'est-à-dire qu'aucune hypothèse n'est faite sur les occurrences de rencontre. Au sein de cette approche, deux stratégies peuvent alors être adoptées. La première consiste à utiliser des probabilités de rencontre et la seconde consiste à prédire les occurrences de rencontre en fonction des observations précédentes. La prédiction de ces occurrences suppose l'existence d'une rencontre périodique entre les nœuds. Toutefois dans un environnement inconnu et en ne faisant aucune hypothèse sur la mobilité des nœuds, l'hypothèse d'une rencontre périodique entre les nœuds est très peu probable. Les techniques probabilistes sur les occurrences de rencontre ont été utilisées par de nombreux protocoles tels que PRoPHET [LDS03], MaxProp [BGJL06] ou encore RAPID [BLV07]. Notre protocole s'inspire des métriques du protocole Plankton [GC13] pour évaluer et prédire les occurrences de rencontre entre les nœuds. Pour cela nous étendons les métriques du protocole Plankton en définissant quatre nouvelles métriques.

Métrique de rencontre moyenne

La métrique de rencontre moyenne, ρ évalue le pourcentage de nœuds rencontrés durant un intervalle de temps fixe. Soit n_T le nombre total de nœuds directs rencontrés durant un intervalle de temps T et N le nombre total des nœuds rencontré sur l'ensemble des intervalles. Si l'on suppose que les occurrences de contacts sont indépendantes entre elles alors la métrique est calculée selon l'équation 6.13.

$$\rho = \frac{n_T}{N} \times 100. \quad (6.13)$$

L'estimation donnée par la métrique ne peut être interprétée qu'à partir de la fin du deuxième intervalle de temps puisque celle-ci serait à 100% à la fin du premier intervalle. La figure 6.3 illustre le calcul de ρ . Dans cet exemple, le nœud estime avoir rencontré 50% des nœuds durant le second intervalle de temps.

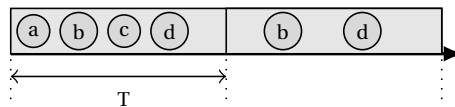


FIGURE 6.3 – Illustration de la métrique de rencontre moyenne

Métrie de rencontre à long terme

Cette métrie calcule le nombre moyen de rencontre sur le long terme entre deux nœuds. Pour cela, Elle utilise une moyenne mobile exponentielle afin de donner plus d'importance aux valeurs récentes et donc d'éviter un effet de retard sur l'estimation. La probabilité à long terme $Plg_t^{u,v}$ est calculée sur la base de plusieurs intervalles de temps T , où chaque occurrence de rencontre du nœud u durant une période t est notée n_t^u , ainsi :

$$Plg_t^{v,u} = \alpha \cdot n_t^u + (1 - \alpha) n_{t-1}^u. \quad (6.14)$$

Afin de réduire le retard de l'estimation, le paramètre α doit vérifier $0 < \alpha < 0.5$ pour donner plus d'importance aux valeurs récentes.

Métrie de rencontre récente

Cette métrie se base sur les occurrences de rencontre récentes observées durant un court intervalle de temps nommé Intervalle de Rencontre Récent (IRR). Soit $Pr_{v,u}^t$ le nombre moyen de contact à court terme calculé entre les nœuds u et v à l'instant t , telle que $n^{u,v}$ représente le nombre d'occurrence de rencontre entre les deux nœuds durant n intervalles. Cette moyenne est donnée par l'équation 6.15 :

$$Pr_{v,u}^t = \frac{n^{u,v}}{n}. \quad (6.15)$$

Le calcul de la moyenne repose un comptage exclusif des occurrences sur chaque intervalle de temps. La figure 6.4 illustre le calcul de cette métrie. Dans cet exemple la fréquence est calculée sur une période de 4 intervalles (n) et est égale à $\frac{3}{4}$, puisque le nœud v rencontre durant 3 intervalles de temps distincts le nœud u .

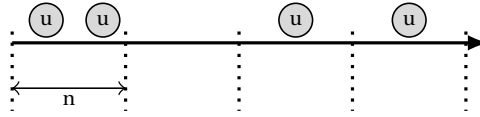


FIGURE 6.4 – Détermination de la probabilité de rencontre récente

Métrie de rencontre indirecte

La dernière métrie quantifie le nombre moyen de rencontre indirecte entre les nœuds. Elle repose sur l'hypothèse que si un nœud rencontre fréquemment deux nœuds v et u durant un même intervalle de temps, alors il existe une forte probabilité que ces deux nœuds se rencontrent directement durant ce même intervalle. Soit $Pi_{v,w,u}^t$ le nombre moyen de rencontre indirecte calculé par le nœud v à l'instant t entre les nœuds u et w . Il est calculé à partir des n derniers intervalles de temps en comptabilisant le nombre de rencontre qu'observe le nœud v avec les nœuds u et w , noté $Pi_{v,w,u}^i = \frac{n_{u,w}}{n}$. Afin d'éviter que le nœud u soit associé à d'autres nœuds, seul le nœud le plus récent ayant l'association la plus forte avec le nœud u est retenu. Par conséquent le nombre moyen de rencontre indirecte entre les nœuds v et u est déterminé par l'équation 6.16.

$$Pi_{v,u}^t = \max_{rc} \{Pi_{v,rc,u}^t\}, rc \text{ étant le nœud rencontré le plus récemment par } v \quad (6.16)$$

La figure 6.5 présente un exemple où les nœuds u et w sont rencontrés durant deux intervalles de temps distincts, donc $Pi_{v,w,u}^t = \frac{2}{4}$.

Discussion

Chacune des métriques donne une information différente sur les occurrences de rencontre entre les nœuds. La métrie p donne une estimation générale d'occurrence de rencontre, tandis

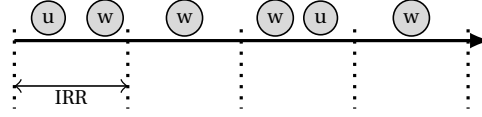


FIGURE 6.5 – Détermination de la probabilité de rencontre indirecte

que les métriques Pr et Plg donnent une estimation sur les occurrences de rencontre à court et à long terme et enfin Pi sur les interactions indirectes entre les nœuds. Ces métriques peuvent donc être classées en deux catégories. La première regroupe uniquement la métrique ρ et est utilisée lorsque aucune connaissance précise sur les rencontres est disponible, les autres métriques sont alors à zéro. Dans le cas contraire, une information sur un nœud est disponible selon un degré de précision différent (à court ou à long terme).

6.4.2 Algorithme de routage développé

L'algorithme de routage que nous avons développé se base sur une technique d'apprentissage par renforcement. Le problème est le suivant : *quelle action doit effectuer l'algorithme de routage lorsque deux nœuds se rencontrent?* Dans un premier temps, nous formulons le problème du routage comme un MDP. Nous définissons ensuite des fonctions de récompense qui prennent en compte la consommation énergétique des nœuds et le délai d'acheminement des données.

Formulation du problème de routage

Nous considérons le réseau comme un système où un état $S(a, b)$ représente une association entre deux nœuds a et b telle que a possède dans sa file d'attente un paquet à envoyer et est en contact avec b . Toutefois, lorsqu'un nœud est en contact avec plusieurs voisins, il se trouve dans une situation opportuniste où il peut maximiser ses chances d'obtenir une récompense élevée. Dans ce cas, le nœud détermine la meilleure récompense en prenant en compte l'ensemble de ses voisins directs comme l'illustre la figure 6.6. Dans cet exemple, s_1 peut choisir s_3 (action a_3), s_2 (action a_2) ou encore rester dans l'état s_1 (action a_1).

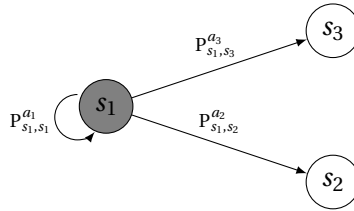


FIGURE 6.6 – Exemple d'un graphe de transition

Chaque action correspond à une décision relative au routage à effectuer par l'algorithme : soit le paquet est gardé (a_{hold}), soit il est transmis ($a_{transmit}$).

Fonctions de récompense

La fonction de récompense est un point important, puisqu'elle détermine le comportement de l'agent. L'objectif de notre protocole est d'utiliser un algorithme d'apprentissage afin de maximiser le taux de paquets délivrés et de réduire le délai d'acheminement, ainsi que la consommation énergétique des nœuds. Les fonctions de récompense prennent donc en compte l'énergie des nœuds ainsi que leur capacité à livrer un message à un nœud destinataire dans un délai imparti.

Le délai d'acheminement peut être estimé en fonction des fréquences de rencontre entre les nœuds calculées à partir des métriques présentées en section 6.4.1. L'objectif de cette fonction de récompense est de valoriser l'information la plus précise disponible concernant la rencontre avec un nœud cible. Lorsqu'un nœud n possède un paquet destiné à d et qu'il rencontre un nœud m ,

ils comparent la valeur de la métrique la plus précise concernant d . La fonction de récompense que nous définissons pénalise le nœud n si la précision de la valeur retournée par la métrique pour le nœud d est inférieure ou égale à celle du nœud m . La fonction de récompense est alors déterminée par l'équation 6.17 avec $\max$ la fonction qui retourne la valeur de la métrique la plus précise.

$$D(n, m) = \begin{cases} 0 & \max(\rho, P_{n,d}^{lg}, P_{n,d}^r, P_{n,d}^i) < \max(\rho, P_{m,d}^{lg}, P_{m,d}^r, P_{m,d}^i) \\ -0.5 & \max(\rho, P_{n,d}^{lg}, P_{n,d}^r, P_{n,d}^i) = \max(\rho, P_{m,d}^{lg}, P_{m,d}^r, P_{m,d}^i) \\ -1 & \max(\rho, P_{n,d}^{lg}, P_{n,d}^r, P_{n,d}^i) > \max(\rho, P_{m,d}^{lg}, P_{m,d}^r, P_{m,d}^i) \end{cases} \quad (6.17)$$

La prise en compte de la consommation d'énergie dans le processus de routage est primordiale dans les réseaux sous-marins. Si un nœud possède en moyenne une fréquence de rencontre supérieure aux autres nœuds, ses voisins auront tendance à le solliciter fréquemment. L'objectif d'une fonction de récompense basée sur la consommation d'énergie est de discriminer les nœuds ayant un faible niveau d'énergie¹ et privilégier les nœuds qui possèdent un niveau d'énergie plus important. Cette stratégie permet d'effectuer un équilibrage de charge et de maximiser la durée de vie des nœuds. Soit un nœud n , la fonction de récompense définie par l'équation 6.18 prend en compte son niveau d'énergie initial et celui restant afin de fournir une valeur comprise entre $[-1, 0]$, comme pour la fonction $D(n, m)$:

$$E(n) = - \left(1 - \frac{E_{res}(n)}{E_{init}(n)} \right). \quad (6.18)$$

Avec $E_{res}(n)$ et $E_{init}(n)$ respectivement, l'énergie restante et l'énergie initiale du nœud n .

Nous définissons maintenant les fonctions de récompenses associées aux actions, a_{hold} et $a_{transmit}$ en combinant les fonctions de récompense calculées respectivement par les équations 6.17 et 6.18. Cette fonction permet d'évaluer la capacité d'un nœud à délivrer un paquet à un destinataire en prenant en compte son niveau d'énergie et leurs occurrences de rencontre. Lorsque le nœud n rencontre un nœud m , la fonction de récompense r_g associée à l'action de garder le paquet est définie par :

$$r_g = \alpha E(n) + \beta D(n, m). \quad (6.19)$$

Avec α et β les poids utilisés pour équilibrer la prise en compte de l'énergie ainsi que du délai d'acheminement. La fonction de récompense r_t associée à l'action de transmettre les données est calculée par :

$$r_t = \alpha E(m) + \beta D(n, m). \quad (6.20)$$

Cette fonction permet d'évaluer la capacité du nœud voisin à délivrer un paquet au destinataire en prenant en compte sa capacité à le rencontrer et son niveau d'énergie.

6.4.3 Gestion des paquets

Cette gestion est effectuée par le protocole et permet de sélectionner les paquets prioritaires en fonction de leur date d'échéance. De cette manière, le délai d'acheminement est minimisé par la transmission des paquets ayant une plus courte échéance. Une file d'attente est associée à chaque destinataire, ainsi chaque paquet à transmettre est stocké dans la file d'attente correspondante. La file d'attente est également triée en fonction de la date d'échéance des paquets.

Ordonnancement des paquets

Chaque paquet p présent dans une file d'attente est trié en fonction de sa date d'échéance, notée t_e . Comme le montre la figure 6.7, cette information permet de trier les paquets en fonction de leur priorité.

Afin de garder à jour les dates d'échéances des paquets, celles-ci sont décrémentées périodiquement. La valeur de t_e est donc communiquée lors de la transmission ou de la réplication

1. qui peut être le résultat d'un nombre de transmissions important.

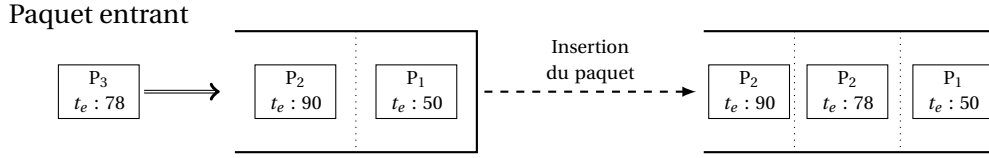


FIGURE 6.7 – Gestion de la priorité des paquets

du paquet. Cette valeur peut être fixée par l'application afin de donner une priorité aux données envoyées ou bien être fixée avec une valeur par défaut $t_{e_{default}}$.

Ordonnancement des files d'attentes

L'objectif de l'algorithme d'ordonnancement utilisé par le nœud est de déterminer le nombre de paquets à envoyer à un voisin. L'ordonnanceur que nous avons développé s'inspire de l'algorithme Weighted Round Robin (WRR) [KSC91] pour calculer la priorité entre les files d'attente. La pondération d'une file d'attente est calculée comme la somme des échéances de chacun des paquets qui la constitue, multiplié par la valeur de l'échéance du premier paquet de la file, ce qui permet de sélectionner la file la plus prioritaire en cas d'égalité des sommes. Soit une file d'attente f de taille n et f_p^l l'échéance l du paquet p ; la pondération de cette file est calculée selon la formule suivante :

$$C(f) = f_0^l \sum_{p=0}^n f_p^l \quad (6.21)$$

Ce poids permet de déterminer la priorité des files d'attente : plus la pondération est faible plus le nombre de paquets à transmettre est important. Elle permet également à l'ordonnanceur de déterminer le nombre de paquets à envoyer pour chaque file, comme le montre l'algorithme 4.

Algorithme 4 Ordonnancement des files d'attente

INPUT: F : Liste de files d'attente

INPUT: C : Liste des pondérations des files d'attente

INPUT: n_f : Taille de la liste f

INPUT: $w_{f,p}$: Poids associé au paquet p de la liste f

```

1: for  $i \leftarrow 1, n_F$  do                                     ▷ Calcul de la pondération de la liste
2:    $C(i) < -0$ 
3:   for  $j \leftarrow 1, n_i$  do
4:      $C(i) \leftarrow C(i) + w_{i,j}$ 
5:   end for
6:    $C(i) \leftarrow C(i) \times w_{i,0}$ 
7:   if  $C(i) > C_{max}$  then
8:      $C_{max} \leftarrow C(i)$ 
9:   end if
10: end for
11: for  $i \leftarrow 1, n_C$  do
12:    $PaquetsEnvoyés(F_i, \frac{C_{max}}{C_i})$                        ▷ Nombre de paquets envoyés
13: end for

```

La transmission des paquets est ensuite gérée par l'algorithme de routage qui va déterminer les récompenses associées à l'envoi ou au stockage des paquets. Lorsque l'algorithme décide de garder les paquets, la file d'attente concernée est délaissée par l'ordonnanceur le temps de la communication avec le nœud voisin. Lorsque l'ordonnanceur a envoyé le nombre de paquets calculé, celui-ci recommence la procédure. Enfin, lorsqu'un nœud rencontre directement le nœud destinataire la file d'attente correspondante est pondérée avec un poids de un.

Duplication des paquets

Le protocole permet de sélectionner le mode de transmission d'un paquet, en autorisant soit son émission (envoyé puis supprimé de la file d'attente) soit sa duplication (envoi d'une copie) en fonction de sa date d'échéance. Cette décision prise par le gestionnaire de paquets est transparente pour l'algorithme d'apprentissage Q-learning. L'objectif du processus de duplication est d'augmenter les chances d'acheminement d'un paquet. L'idée est d'utiliser la valeur de la date d'échéance (t_e) d'un paquet pour déterminer l'urgence de transmission associée. L'instant de duplication d'un paquet est calculé dès son stockage dans la file d'attente. Soit t_d l'instant associé à la duplication d'un message, qui est calculé selon l'équation 6.22.

$$t_d = \begin{cases} t + (t_e \times \max(Pr, Pi, Plg)), & \text{si } Pr \neq 0 \vee Pi \neq 0 \vee Plg \neq 0 \\ t + \frac{t_e}{2}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (6.22)$$

avec t l'instant courant et Pr, Pi, Plg qui sont les valeurs retournées par les métriques de rencontre récente, de rencontre indirecte et à long terme. Chacune des valeurs retournées par ces métriques doit être calculée à partir d'une même référence temporelle comme par exemple l'Intervalle de Rencontre Récent (IRR). Plus les valeurs retournées par ces métriques sont importantes, plus un nœud a de chance de rencontrer le destinataire final et donc de respecter la date d'échéance du paquet. Un paquet est répliqué si $t > t_d$, ce qui signifie que l'échéance associée à la réplication du paquet a expiré. Si aucune information précise sur les occurrences de rencontre avec le destinataire final est disponible, le paquet est alors dupliqué lorsque son échéance à la réception a été réduite de moitié. De cette manière, si aucune information n'est disponible dès le stockage du paquet alors celui-ci n'est pas automatiquement répliqué. Bien que la stratégie de réplication des données augmente les chances de réception du paquet par le destinataire, elle engendre une consommation accrue de la mémoire. Afin de réduire cette surcharge, le protocole n'autorise qu'une seule duplication d'un paquet et marque les deux copies afin de ne plus autoriser de duplications. Il se peut qu'un nœud reçoive les deux répliques d'un même paquet, dans ce cas il supprime la copie du message reçu et la marque du paquet stocké.

6.4.4 Les messages de routage

Nous détaillons dans cette section le format des messages utilisés par le protocole. Deux messages sont à dénombrer : le premier appelé BEACON est envoyé périodiquement, le second appelé métadonnée de routage est utilisé lors d'un échange entre les nœuds.

Les messages BEACON

Le protocole implémente un mécanisme de découverte de voisins via l'utilisation d'un paquet appelé BEACON diffusé périodiquement. Il permet à un nœud de s'annoncer et contient des informations nécessaires pour l'algorithme Q-learning. La structure du paquet BEACON est montrée figure 6.8. Il contient quatre champs. Le premier permet d'identifier le type de paquet (codé sur 8 bits). Le second champ contient l'adresse de l'émetteur du message. Nous définissons la taille de ce champ à 8 bits afin de réduire au maximum la taille de l'adresse physique de l'interface, la taille d'une adresse MAC classique étant codée sur 48 bit est beaucoup trop lourde pour être utilisée ici. Le champ Énergie contient la valeur utilisée pour la fonction de récompense basée sur l'énergie (équation 6.18). Enfin le dernier champ contient la valeur de $\max_a Q(s_{t+1}, a)$ aussi notée $V^*(s_{t+1}, a)$ et utilisée dans l'équation 6.12.

0	7 8	15 16	23 24	31
Type	Source	Énergie	Valeur de V	

FIGURE 6.8 – Format du paquet BEACON du protocole de routage des réseaux sous-marins

La longueur totale du paquet étant de 32 bits, sa faible taille impacte peu la bande passante.

Les métadonnées

Bien que les données de routage soient envoyées périodiquement, chaque envoi nécessite de mettre à jour les valeurs utilisées par l'algorithme d'apprentissage pour prendre en compte les actions récentes. Par conséquent, dès lors qu'un paquet de données est envoyé, des métadonnées y sont attachées pour informer les nœuds voisins de l'état du nœud émetteur. Ces métadonnées donnent des informations à la fois sur son état, mais aussi des informations sur la fréquence de rencontre avec d'autres nœuds. Cette technique permet de réduire le nombre de transmissions. Les métadonnées ajoutées aux paquets de données contiennent le type de paquet (8 bits) l'identifiant du protocole encapsulant les données transmises (16 bits), l'énergie du nœud (8 bits), la valeur de V (8 bits), la durée de vie du message (16 bits), le champ requête (8 bits) contient l'identifiant du nœud dont le nombre d'occurrences de rencontre est demandé, le champ réponse (8 bits) contient les valeurs retournées par les métriques présentées section 6.4.1 et l'indicateur de copie du message, utilisée par le mécanisme de réplication du nœud (1 bit). La figure 6.9 montre la structure du paquet contenant les métadonnées échangées.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Type								Prochain protocole																Énergie									
Valeur de V								Deadline																Requête									
Réponse								C																									

FIGURE 6.9 – Format des métadonnées ajoutées par le protocole de routage des réseaux sous-marins

La taille maximale des métadonnées échangées est de 73 bits ce qui tend à limiter leur impact lors de l'échange des données. Nous attirons l'attention sur le champ Réponse (8 bits) contenant le résultat de la métrique qui quantifie les occurrences de rencontre. Trois indicateurs donnent une information sur les occurrences de rencontre avec le nœud souhaité et une ne fournit qu'une information sur le nombre moyen de nœuds rencontrés. Ces deux types d'informations doivent être distinguées du fait qu'elles quantifient des événements différents, pour cela le champ Réponse codé sur 8 bits est scindé en deux parties distinctes comme le montre la figure 6.10.

0	1	2	3	4	5	6	7
T	Métrique						

FIGURE 6.10 – Détail du champ Réponse

Le premier champ indique le type de métrique utilisée à savoir p qui détermine le nombre moyen de nœuds rencontrés et P qui quantifie le nombre d'occurrences de rencontre avec un nœud spécifique. Le second champ contient la valeur de la métrique.

6.5 Simulation et évaluation de performance

Afin d'évaluer les performances du protocole proposé, celui-ci est testé au sein d'un scénario réaliste. Ce scénario permet d'évaluer les performances de routage des protocoles notamment en termes de taux de paquets réceptionnés et de délai d'acheminement. Il permet également d'observer la consommation énergétique des nœuds qui est un critère significatif dans les réseaux sous-marins. Pour cela, nous comparons notre protocole nommé ROGUE à des approches classiques, telles que la technique de livraison directe et deux versions du protocole de type Spray-And-Wait (nombre limité et illimité de messages). Dans l'environnement simulé, vingt nœuds évoluent sur une zone de 1 km^2 avec une vitesse minimale de 0.25 m.s^{-1} et maximale de 2.8 m.s^{-1} . Les engins se déplacent selon un modèle de mobilité réaliste décrivant les mouvements de l'engin sous-marin REMUS. La table 6.3 résume les paramètres de simulation, en particulier les propriétés de propagation du signal et les caractéristiques des interfaces réseaux.

TABLEAU 6.3 – Paramètres de l’environnement de simulation pour les réseaux acoustiques sous-marins

Paramètres PHY	
Modèle	UanPhyGen (ns-3)
Puissance de transmission	90
Puissance de réception	0
Puissance de détection (dB)	10
Paramètres MAC	
Protocole d’accès	ALOHA
Débit	80bps
Taille des files d’attente	2.4Ko
Paramètres des modèles de propagation	
Modèle	Thorp

6.5.1 Caractérisation des communications acoustiques

La figure 6.11 montre la relation entre la taille des paquets transmis, la consommation énergétique des nœuds et le temps de transmission. Ces observations nous permettent de caractériser le modèle de communication acoustique sous-marine utilisé dans le simulateur ns-3. On observe que la relation entre la taille des trames envoyées et la consommation énergétique ainsi que le temps de transmission est linéaire comme le montrent les courbes en bleue, obtenues par une régression linéaire. Le faible débit du lien, ici à 80 bps induit de longs délais de transmission lorsque les trames ont une taille conséquente. La consommation énergétique est également plus élevée que dans les réseaux Wi-Fi au regard de la figure 5.6. Ces deux courbes montrent l’importance de la taille des trames envoyées qui ont un impact sur le temps d’utilisation du média et de la consommation énergétique des nœuds.

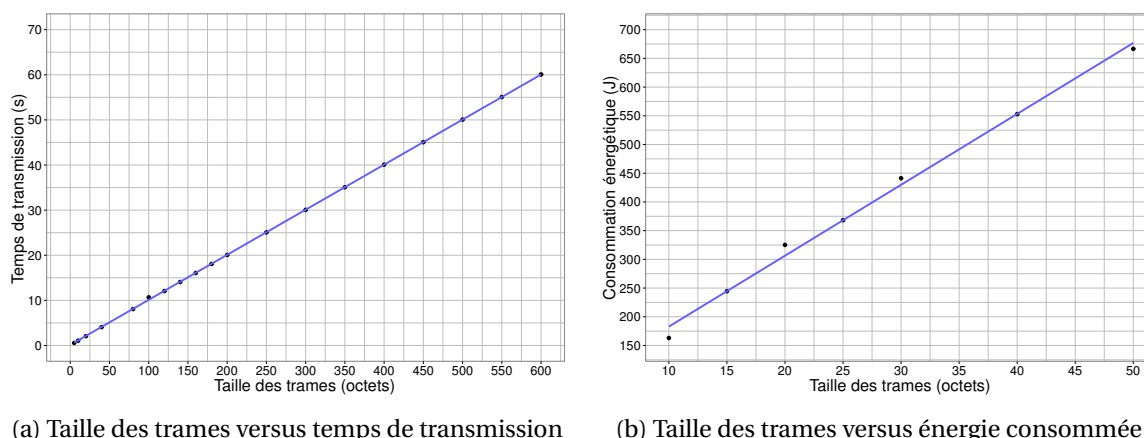


FIGURE 6.11 – Caractérisation des communications acoustiques sous-marines

6.5.2 Performance du protocole ROGUE

Les performances des protocoles sont évaluées sur la base du taux de paquets délivrés et du délai d’acheminement. Chacun des protocoles Spray-and-Wait et de délivrance directe génère un paquet de sonde toute les deux secondes afin de déterminer la présence d’un nœud. Deux versions du protocole Spray-and-Wait sont utilisées dans notre évaluation où l’une limite le nombre

de répliquions des messages (fixé à trois) tandis que l'autre permet la répliquion illimitée d'un message. Afin d'évaluer le taux de paquets reçus et le délai d'acheminement, cinq nœuds transmettent des données dont la taille est de huit octets. Le faible déploiement de nœuds dans un réseau sous-marin rend peu propice l'observation de l'impact du nombre de nœuds dans un réseau. C'est pourquoi nous nous focalisons sur les performances de routage en fonction du débit applicatif.

Taux de paquets délivrés. Le taux de paquets délivrés (PDR) est défini comme le rapport entre le nombre de paquets reçus par le destinataire et le nombre de paquet envoyés par le nœud source. La figure 6.12 montre le taux de réception pour les quatre protocoles considérés. Le PDR résultant de la technique de délivrance directe est très faible et s'explique par la faible occurrence de rencontre directe entre le nœud source et destination. Les protocoles de type Spray-and-Wait obtiennent un taux de réception supérieur et notamment lorsque le nombre de copies augmente. En effet, plus un message est disséminé sur un grand nombre de nœuds, plus la probabilité de le livrer augmente. Toutefois seul le nœud source du message est autorisé à le copier ce qui limite le nombre de répliquion au nombre de nœud rencontré. Le protocole proposé (ROGUE) offre les meilleures performances, grâce aux mécanismes de transmission et de répliquion entre les nœuds. Le débit applicatif impacte le taux de paquets délivrés puisque plus le nombre de paquet généré est important plus le taux de perte est important puisque la taille des file d'attente maintenue est fixe. Le protocole ROGUE présente le faible pourcentage de dégradation (environ 5%) ce qui indique qu'il supporte mieux l'augmentation du débit applicatif.

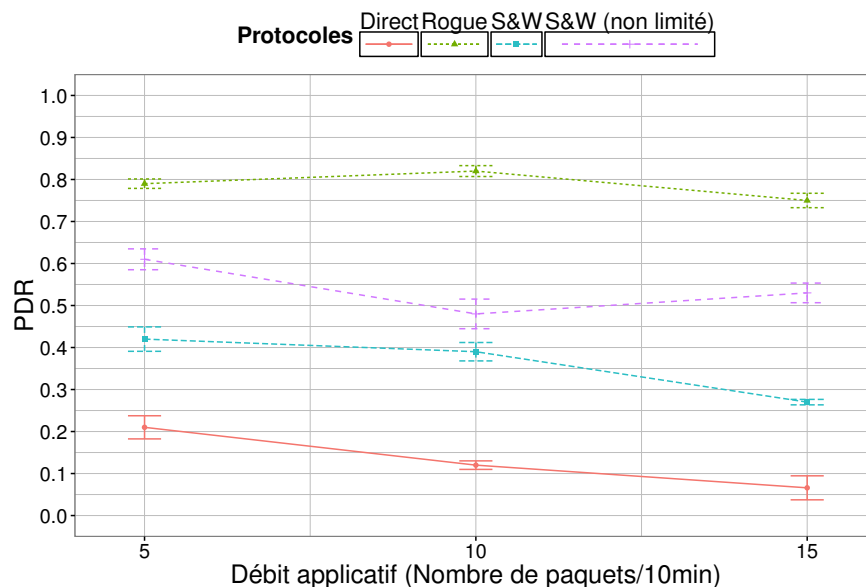


FIGURE 6.12 – PDR en fonction du débit applicatif

Délai d'acheminement. La figure 6.13 montre le délai d'acheminement des données pour les quatre protocoles considérés. Le protocole ROGUE présente les meilleurs performances avec un délai d'acheminement plus faible. Cette performance s'explique par les mécanismes de transmission et de répliquions utilisés qui permettent de réduire les délais d'acheminement. Toutefois, l'augmentation du débit applicatif tend à dégrader les performances du protocole (augmentation du délai de 8%) puisque le nombre paquets à transmettre augmente.

6.5.3 Consommation Énergétique

L'efficacité énergétique des protocoles est également une composante importante dans les réseaux sous-marins puisqu'elle dépend du nombre de transmissions et de la taille des trames

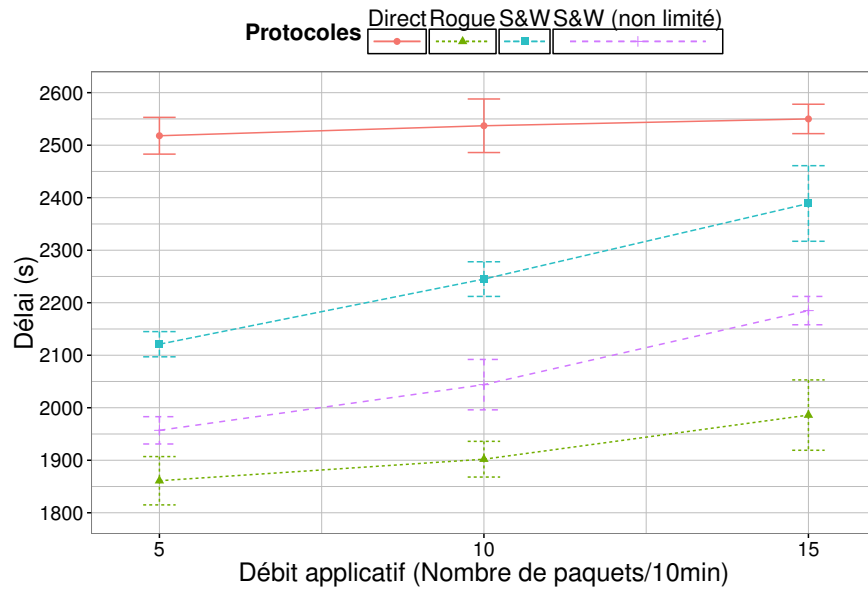


FIGURE 6.13 – Délai d'acheminement en fonction du débit applicatif

transmises. Afin de déterminer la consommation énergétique maximale des nœuds, nous sélectionnons le scénario où le débit applicatif est de cinq paquets toutes les 10 minutes. Dans ce scénario les protocoles obtiennent le meilleur PDR et donc transmettent le plus d'informations. La consommation énergétique est mesurée pour les paquets transmis avec succès pour les quatre protocoles. La figure 6.14 montre la consommation moyenne des nœuds. Le protocole utilisant une technique de routage directe possède la meilleure efficacité énergétique puisque l'échange des données ne s'effectue qu'uniquement lorsque le nœud source et destination se rencontrent. La consommation énergétique du protocole Spray-and-Wait augmente en fonction du nombre de copies autorisées. Le protocole ROGUE quant à lui est plus efficace que le protocole Spray-and-Wait lorsqu'il peut dupliquer un message de manière illimitée. L'utilisation d'un algorithme d'apprentissage basé sur la consommation énergétique des nœuds, lui permet de limiter son nombre de transmissions et donc de réduire sa consommation énergétique.

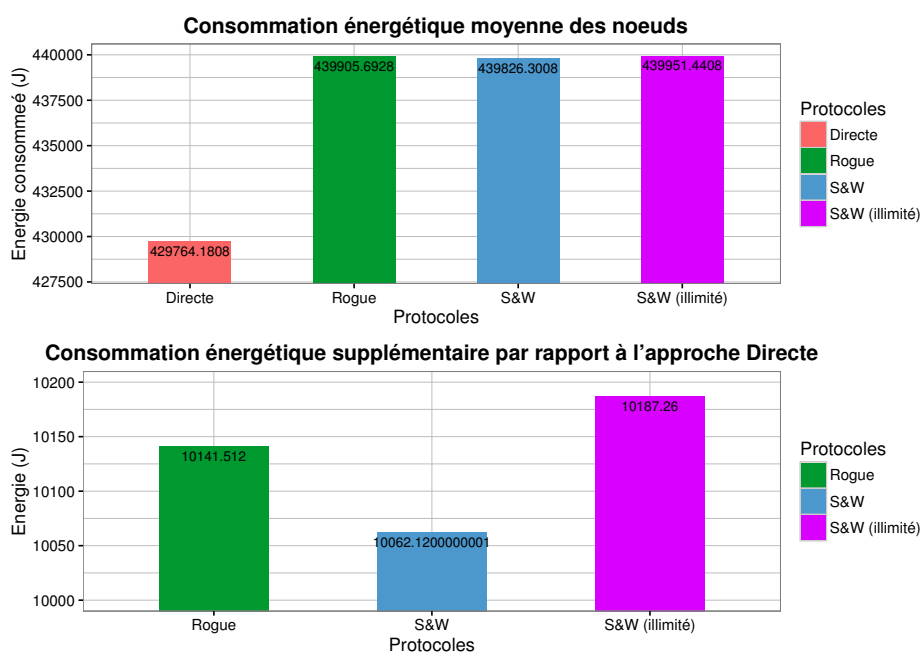


FIGURE 6.14 – Consommation énergétique moyenne des nœuds

6.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit un protocole de routage DTN conçu pour les réseaux mobiles acoustiques. Le protocole est basé sur une machine à apprentissage (Q-Learning) et vise à maximiser le taux de paquets délivrés, minimiser le délai de transmission et réduire la consommation énergétique. Le résultat des simulations montre que ce protocole permet d'obtenir un compromis entre performance et économie d'énergie se plaçant comme le meilleur en ce qui concerne le taux de paquets délivrés et le délai d'acheminement et se place troisième en ce qui concerne l'efficacité énergétique (tableau 6.4).

TABLEAU 6.4 – Comparaison des performances des protocoles

	Directe	Spray-and-Wait	Spray-and-Wait (illimité)	ROGUE
Taux de délivrance	-	+	++	+++
Délai d'acheminement	-	+	++	+++
Consommation énergétique	+++	++	-	+

Le protocole de routage utilisé dans les réseaux sous-marins peut être utilisé également dans les réseaux terrestres de drones (robots). En effet, bien que ces réseaux possèdent une topologie qui évolue rapidement au cours du temps, une connectivité temporaire peut apparaître. Dans ce contexte il est indispensable d'adapter la stratégie de routage (MANET ou DTN) en fonction de la topologie et ceci fait l'objet d'étude du prochain chapitre.

Chapitre 7

Protocole de routage MANET/DTN pour les réseaux terrestres

« There are some things that can't be controlled. »

Leonard Kleinrock

Sommaire

7.1 Introduction	125
7.2 Les protocoles de routages hybride MANET-DTN	126
7.3 Conception du protocole hybride MANET/DTN	127
7.3.1 Algorithme de routage MANET	127
7.3.2 Extension du routage DTN	133
7.3.3 Implémentation du protocole	134
7.4 Simulation et évaluation des performances	136
7.4.1 Évaluation des protocoles MANETs	136
7.4.2 Évaluation des protocoles DTN	140
7.4.3 Évaluation des deux approches	141
7.5 Conclusion	142

7.1 Introduction

Nous considérons en tant que réseaux terrestres, les réseaux constitués d'engins aériens, terrestres et maritimes de surface. Les différents types d'engins évoluent dans des environnements différents, ce qui impacte à la fois leur mobilité et les propriétés physiques du canal de communication. Nous considérons dans ces réseaux, que les engins utilisent la même technologie de communication à savoir le Wi-Fi. En effet, il existe des interfaces Wi-Fi pour chaque type de réseau considéré. Toutefois, l'utilisation d'une même technologie de communication ne permet pas de garantir la bonne coopération entre les engins. La différente mobilité des engins et les propriétés distinctes des canaux de communication sont des obstacles majeurs à l'acheminement des informations de bout en bout puisqu'elles engendrent de nombreuses disparitions de liens. Néanmoins, la topologie formée par le réseau présente des composantes connexes temporaires. Il est donc possible d'exploiter cette propriété afin d'acheminer des données entre deux nœuds dit connectés.

Si l'on fait l'hypothèse que la mobilité des nœuds n'est pas connue, il est impossible de prédire la topologie formée par les engins au cours de la mission. Toutefois, il peut exister de manière temporaire une connectivité entre les nœuds, mais qui ne peut pas être exploitée par une technique de routage DTN seule. Il est donc indispensable de coupler une approche MANET et DTN pour maximiser les performances de routage. Le protocole décrit dans ce chapitre est une version de ROGUE, conçu pour les réseaux mobiles terrestres, qui combine à la fois l'approche DTN telle que décrite dans le chapitre 6 et une approche MANET. Le protocole utilise également l'estimateur F-ETX (chapitre 5) afin d'évaluer la qualité et l'état des liens. Notre protocole exploite un algorithme de routage basé sur l'apprentissage automatique pour la partie DTN et de type heuristique pour la partie MANET. La métrique F-ETX est utilisée par le protocole pour évaluer et déterminer l'état du lien local et du chemin entre deux nœuds dit connectés. Notre objectif est de maximiser les performances de routage en terme de taux de paquets délivrés et de délai d'acheminement.

Ce chapitre est divisé en trois parties. Dans la première partie nous décrivons les protocoles de routage hybrides MANET/DTN. Nous détaillons ensuite le fonctionnement du protocole proposé qui intègre un algorithme de routage MANET et DTN ainsi que la métrique F-ETX. Dans la dernière partie nous présentons les résultats obtenus à partir de scénarios de simulation réalistes.

7.2 Les protocoles de routages hybride MANET-DTN

Les protocoles de routage hybrides MANET/DTN possèdent la particularité d'adapter leur politique de routage en fonction de la connectivité du réseau. Comme le confirment Manfredi et al. [MCK11], l'utilisation d'une stratégie de routage de type MANET est uniquement valable lorsque la probabilité d'existence d'une route est élevée. Au contraire, lorsque les routes apparaissent de manière sporadique il est préférable d'utiliser une politique de routage DTN. De manière formelle, si on représente la topologie d'un réseau mobile par un graphe évolutif non orienté $G_i = (V, E_i)$. Alors la politique de routage MANET est applicable si et seulement si il existe au moins un trajet non strict entre deux sommets du graphe dans lequel les arêtes du chemin sont strictement traversées à la même date. Dans le cas contraire la politique de routage DTN est appliquée. La figure 7.1 montre un exemple d'un trajet strict et d'un trajet non strict qui illustrent le cas d'utilisation d'un routage MANET et d'un routage DTN.

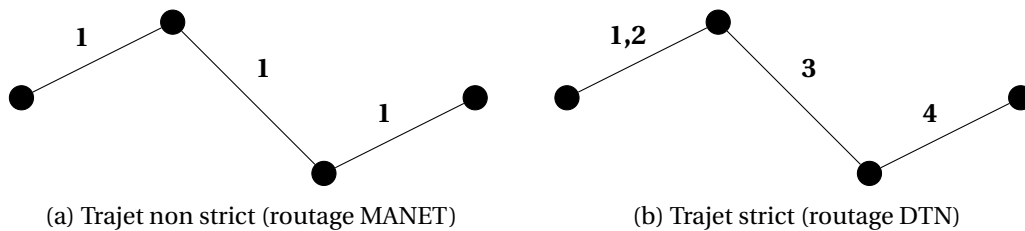


FIGURE 7.1 – Graphe évolutif : trajet strict et trajet non strict

On remarque que l'utilisation d'une seule technique de routage (MANET ou DTN) ne permet d'acheminer des données que dans des cas spécifiques. Pour répondre à ce problème des protocoles hybrides utilisant les deux approches ont été proposés afin d'adapter la politique de routage en fonction du contexte. Une description de ces protocoles est donnée ci-dessous.

Le protocole Context-Aware Routing (CAR) [MM09] combine un routage MANET proactif et un routage DTN basé sur la probabilité de rencontre entre les nœuds. Chaque nœud du réseau diffuse périodiquement des messages de contrôle afin de découvrir l'existence d'un chemin entre des nœuds dit connectés et d'échanger les probabilités de rencontre avec les autres nœuds. Le protocole HYbrid Manet Dtn (HYMAD) [WC10] utilise une technique de gestion de groupes afin de déterminer la technique de routage à utiliser. Un ensemble de nœuds fait partie du même groupe si le graphe associé à un diamètre inférieur à une valeur maximale qui est fixée par le protocole. Le routage des communications des nœuds appartenant à un même groupe s'effectue à l'aide d'un protocole proactif à vecteur de distance. Lorsque les nœuds font partie de groupes disjoints, le

roulage des données se fait à l'aide d'un protocole de type Spray-and-Wait. Le protocole Store and Forward BATMAN (SF-BATMAN) [DNT12] est une extension du protocole BATMAN qui utilise des files d'attente afin de stocker les messages en attente de transmission. Le protocole Delay Tolerant Structured OLSR (DTS-OLSR) [PTM⁺10] est une extension de OLSR dans laquelle des nœuds supportent le mode d'acheminement DTN. Il utilise une technique d'overlay afin de construire une topologie qui permet d'intégrer de manière transparente les nœuds DTN et non DTN. Pour bénéficier d'un service de routage DTN, chaque nœud non DTN doit posséder dans sa table de routage, une entrée valide contenant l'adresse d'un nœud DTN. Le routage DTN ne s'effectue qu'entre les nœuds supportant ce mode d'acheminement; dans les autres cas les nœuds utilisent un routage de type MANET. Il existe une version DTN du protocole AODV [OKD06] qui étend les messages de type Route Request et Route Reply afin de découvrir les nœuds supportant la technique de routage DTN.

On observe que la majorité des protocoles qui combinent les deux approches sont des extensions des protocoles MANETs qui ajoutent une technique de routage DTN. Ils permettent de faire cohabiter des nœuds DTN et non DTN au sein d'un même réseau. Ces protocoles ont pour objectif de maximiser uniquement le taux de paquets délivrés, or les réseaux de véhicules autonomes terrestres sont caractérisés par une mobilité importante qui conduit à fortement dégrader les performances des protocoles de routage. Il est donc indispensable pour un protocole de prendre en charge les caractéristiques associées à ces réseaux.

Dans le chapitre 5 nous avons présenté une métrique composée de plusieurs estimateurs qui nous permet d'évaluer la qualité et l'état d'un lien. Toutefois, l'intégration de ces estimateurs dans un processus de routage nécessite des modifications. Nous avons présenté dans le chapitre précédent la version de ROGUE conçue pour les réseaux sous-marins et qui utilise un algorithme de routage DTN. Nous proposons la version de ROGUE pour les réseaux terrestres, qui utilise la métrique F-ETX et combine un routage de type MANET qui s'inspire du protocole BATMAN et un routage de type DTN qui lui s'inspire de notre protocole décrit dans le chapitre précédent.

7.3 Conception du protocole hybride MANET/DTN

Le protocole que nous proposons combine une technique de routage MANET et une technique DTN et adapte sa politique en fonction de la topologie du réseau. L'algorithme de routage MANET s'inspire du protocole Better Approach to Mobile Adhoc Networking (BATMAN) [QC] et utilise la métrique F-ETX (chapitre 5) pour évaluer la qualité et l'état des liens locaux. L'algorithme de routage DTN s'inspire du protocole conçu pour les réseaux sous-marins décrit dans le chapitre 6. Puisque le protocole utilise uniquement des informations locales, le routage des données peut être effectué au niveau MAC. Il est donc indépendant des technologies des couches supérieures, ce qui permet d'augmenter sa portabilité. Par ailleurs, l'économie réalisée au niveau du volume des en-tête transmises permet de réduire son impact en terme de bande passante.

7.3.1 Algorithme de routage MANET

L'utilisation d'un algorithme de routage MANET permet d'exploiter les chemins entre deux nœuds dit connectés. La présence d'un chemin peut être la conséquence d'une zone ayant une forte densité de nœuds ou bien de la rencontre éphémère entre plusieurs nœuds durant un court intervalle de temps. L'objectif du protocole est donc de détecter ces configurations afin d'acheminer un nombre maximum de paquets. Notre algorithme de routage MANET s'inspire de l'algorithme du protocole BATMAN conçu pour les réseaux maillés sans fil. Il repose sur une technique de routage proactive et utilise les messages de contrôle afin d'évaluer la qualité des liens et annoncer la présence d'un chemin.

Évaluation d'un lien local

L'utilisation d'une technique de routage proactive nécessite l'envoi de messages de contrôle afin que les nœuds découvrent la topologie du réseau et alimentent leurs tables de routage. Ces messages de contrôle sont également utilisés par le protocole pour évaluer la qualité du lien. Nous rappelons que la qualité d'un lien est évaluée avec F-ETX en utilisant deux ratios : le ratio d_f correspond aux paquets transmis avec succès à un voisin, le second ratio d_r correspond aux paquets reçus en retour. Afin qu'un nœud puisse déterminer le ratio d_f d'un lien, il est indispensable que le nœud voisin transmette son ratio d_r . Les nœuds s'échangent ainsi leur ratio d_r respectif. La figure 7.2 illustre le calcul des ratios au cours du temps.

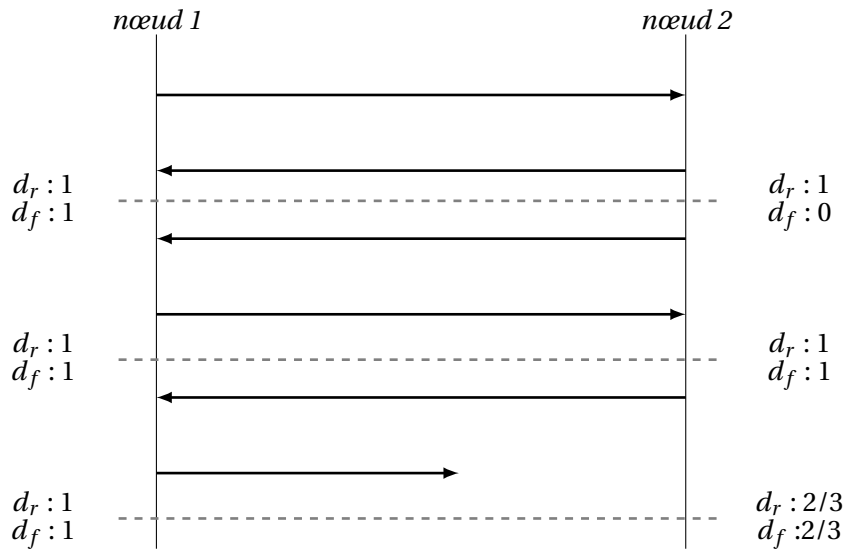


FIGURE 7.2 – Illustration d'un échange des ratios entre deux nœuds pour calculer la qualité d'un lien

On remarque que l'échange du ratio d_r entre les nœuds introduit un temps de retard sur l'estimation du taux de réception des paquets transmis. Pour éviter cette situation, les auteurs de BATMAN proposent une méthode alternative que nous utilisons dans notre protocole. Elle permet aux nœuds de ne plus avoir à s'échanger les ratios en modifiant le mode de retransmission des messages comme le montre la figure 7.3.



FIGURE 7.3 – Évaluation d'un lien local avec F-ETX

Le calcul du ratio d_r est inchangé puisqu'il dépend du nombre de messages émis par le voisin et qui ont été reçus (ou perdus). La ratio d_f est calculé à partir des paquets envoyés à un voisin et retransmis par celui-ci. En effet, si $d_r \times d_f$ correspond au ratio des paquets transmis et dont les acquittements correspondants sont reçus avec succès alors le ratio d_f peut être obtenu connaissant d_r . Il est donc indispensable que chaque nœud puisse retransmettre les messages de contrôle reçus. Toutefois, afin d'éviter une retransmission infinie des messages, un nœud ne retransmet pas ses propres messages de contrôle. L'utilisation de cette technique présente de nombreux avantages. Premièrement, les nœuds n'ont pas besoin de s'échanger les ratios ce qui économise l'ajout d'un champ dans les messages de contrôle. Deuxièmement, si un message transmis par un voisin (associé à d_r) est perdu, le ratio d_f peut être calculé puisqu'il est déterminé en fonction de l'état de réception d'un autre message. Troisièmement, les deux ratios sont déterminés durant la même période ce qui n'introduit pas un retard sur l'estimation de la qualité. Enfin, chaque nœud est responsable de l'estimation de la qualité d'un lien, puisque le couple de ratios est calculé à partir

du même message. Toutefois, cette technique présente l'inconvénient d'augmenter le nombre de messages transmis ce qui réduit la bande passante disponible pour les données.

Afin d'avoir un compromis entre précision pour détecter et évaluer la qualité et l'état d'un lien et réduction de la bande passante allouée aux messages de contrôle, nous définissons la période d'envoi de ces messages de l'ordre de la seconde. Cependant, pour éviter les collisions entre les messages, un délai doit être introduit afin de légèrement désynchroniser les transmissions. Ce délai doit être introduit à la fois au niveau de l'envoi périodique, suivant une variable aléatoire définie de manière empirique $[0, 200ms]$ et au niveau de la retransmission des messages avec un délai aléatoire compris entre $200ms$ et $400ms$. Lorsqu'un nœud reçoit son propre message, il le traite pour quantifier le taux de perte des messages transmis mais ne le retransmettra pas.

Les messages de contrôle doivent donc posséder deux champs pour permettre aux nœuds de calculer la qualité d'un lien local : (i) l'adresse du nœud créateur du message de contrôle, et (ii) l'adresse de son dernier émetteur. La méthode de calcul de la qualité du lien local est donnée par l'algorithme 5, avec *AddrOrig* l'adresse du nœud créateur du message et *AddrPrec* celle de son dernier émetteur. Afin de déterminer le nombre de paquets reçus et perdus, chaque paquet est identifié par un numéro de séquence attribué de manière unique.

Algorithme 5 Calcul de la qualité d'un lien local

INPUT: paquet : paquet réceptionné

INPUT: addr : adresse du nœud

```

1: if paquet.AddrOrig = paquet.AddrPrec then
2:   Calculdr()
3:   paquet.AddrDer ← addr
4:   EnvoyerPaquet(paquet, paquet.AddrPrec)
5: else if paquet.AddrOrig = addr then
6:   Calculdf()
7:   SupprimerPaquet(paquet)
8: else
9:   SupprimerPaquet(paquet)
10: end if

```

Découverte et évaluation de la qualité d'un chemin

Le processus de découverte de chemins est assuré par un mécanisme de retransmission des messages de contrôle afin de propager l'information à l'ensemble des nœuds connectés. Les messages de contrôle contiennent également la qualité du chemin annoncé afin que chaque nœud puisse déterminer le chemin ayant la meilleure qualité.

La qualité d'un chemin est déterminée en fonction de deux informations : (i) la qualité des liens qui composent le chemin et (ii) le nombre de sauts correspondant. Son évaluation impose donc un compromis entre ces deux grandeurs. Lorsqu'un nœud reçoit un message de contrôle il calcule la qualité du chemin associée (Q_c) en fonction de la qualité du chemin annoncée dans le message (Q_{ca}), de la qualité du lien local (Q_{local}) et d'une pénalité en relation avec le nombre de sauts effectué par le message (P_s) :

$$Q_c = Q_{ca} \times Q_{local} \times P_s \quad (7.1)$$

La qualité d'un chemin donnée ci-dessus est normalisée entre $[0,1]$. En pratique, la qualité d'un chemin est normalisée dans $[0, 255]$ (codée sur huit bits). Elle s'exprime alors par l'équation 7.2 :

$$Q_c = \frac{Q_{ca} \times Q_{local} \times P_s}{(Q_{max})^2} \quad (7.2)$$

Avec Q_{max} la valeur maximale que peut prendre une estimation (255). Lorsqu'un chemin est annoncé, la valeur Q_{ca} est fixée au départ à 255. Cette valeur décroît par la suite en fonction de la

qualité des liens que traverse le message et en fonction de la pénalité de saut. Celle-ci sanctionne la qualité d'un chemin à chaque retransmission du message selon une pénalité, P , telle que :

$$P_s = Q_{max} - P. \quad (7.3)$$

Si l'on considère que $Q_{max} = 255$ alors nous fixons la valeur de la pénalité P à dix, valeur également utilisée dans le protocole BATMAN. La figure 7.4 montre les tables de routage associées aux nœuds qui contiennent les évaluations de la qualité des chemins. Si l'on considère uniquement le nœud A, il estime la qualité du chemin menant vers le nœud D avec une qualité de 255 puisque $Q_{ca} = Q_{local} = 255$ et que les nœuds A et D sont des voisins directs, donc $P_s = 255$. Concernant le chemin entre les nœuds A et B, ils évaluent la qualité du chemin à 178 puisque la qualité du lien local est de 70% telle que $Q_{local} = (70 \times 255)/100 = 178$ et que $Q_{ca} = 255$ et $P_s = 255$. Concernant le chemin entre les nœuds A et C, en considérant la qualité du chemin annoncé par B telle que $Q_{ca} = 255$ et que la qualité du lien local Q_{local} est de 178 et qu'une pénalité de saut est appliquée, la qualité du chemin, Q_c , est égale à 171.

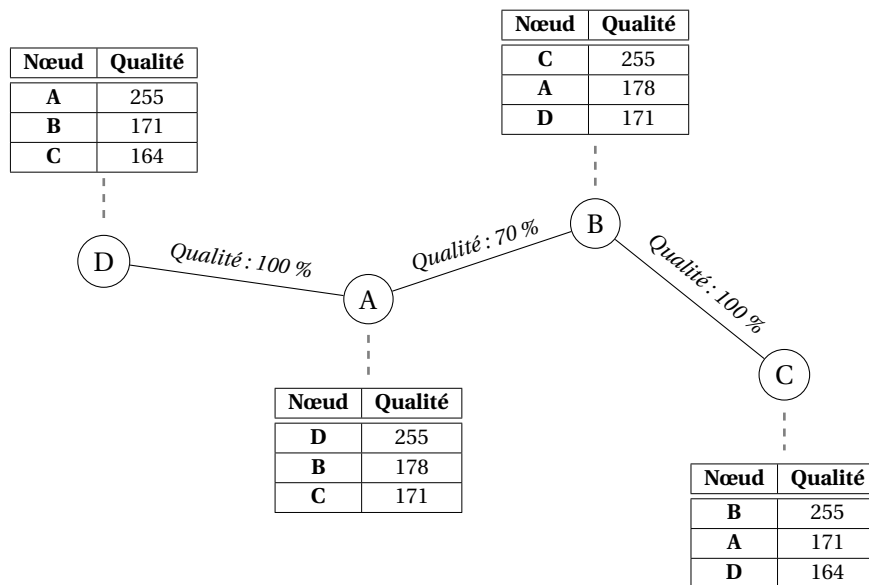


FIGURE 7.4 – Évaluation de la qualité d'un chemin

La prise en compte du nombre de sauts dans le processus d'évaluation de la qualité du chemin permet d'éviter la propagation infinie d'un message. En effet, si la pénalité $P > 0$ la qualité du chemin annoncée (Q_{ca}) est réduite à chaque retransmission du message et ce quel que soit la qualité du lien local (Q_{local}). Lorsque la qualité du chemin annoncée atteint zéro, le message est automatiquement supprimé.

La sélection d'un chemin se traduit dans la table de routage par la mémorisation de l'adresse du nœud voisin qui l'a annoncé. La topologie du réseau peut changer au cours du temps ce qui amène un nœud à sélectionner un autre voisin associé à un meilleur chemin. Bien que la métrique F-ETX permet de détecter la disparition d'un lien local, cette information n'est pas propagée dans le réseau. La sélection d'un chemin en fonction de sa qualité ne permet pas de garantir la sélection d'un chemin existant, comme le montre la figure 7.5.

Le déplacement du nœud D amène la topologie du réseau à changer. Lorsque le nœud D se déclare auprès du nœud C, celui-ci détecte qu'il devient un voisin direct et met à jour sa table de routage. En parallèle, le nœud B détecte que le nœud D ne fait plus partie de son voisinage direct et supprime l'entrée associée dans sa table de routage. Lorsque le nœud C annonce le chemin vers D, le nœud A compare la qualité du chemin, $B \leftrightarrow D$ qui est supérieure à celle du chemin $C \leftrightarrow D$. De ce fait, le nœud A garde dans sa table de routage le chemin $B \leftrightarrow D$ et supprime le chemin annoncé par C. Par conséquent, le nœud B ne reçoit pas l'annonce du chemin qui mène vers D. Ce processus de sélection est donc insuffisant pour garantir la sélection d'un chemin valide.

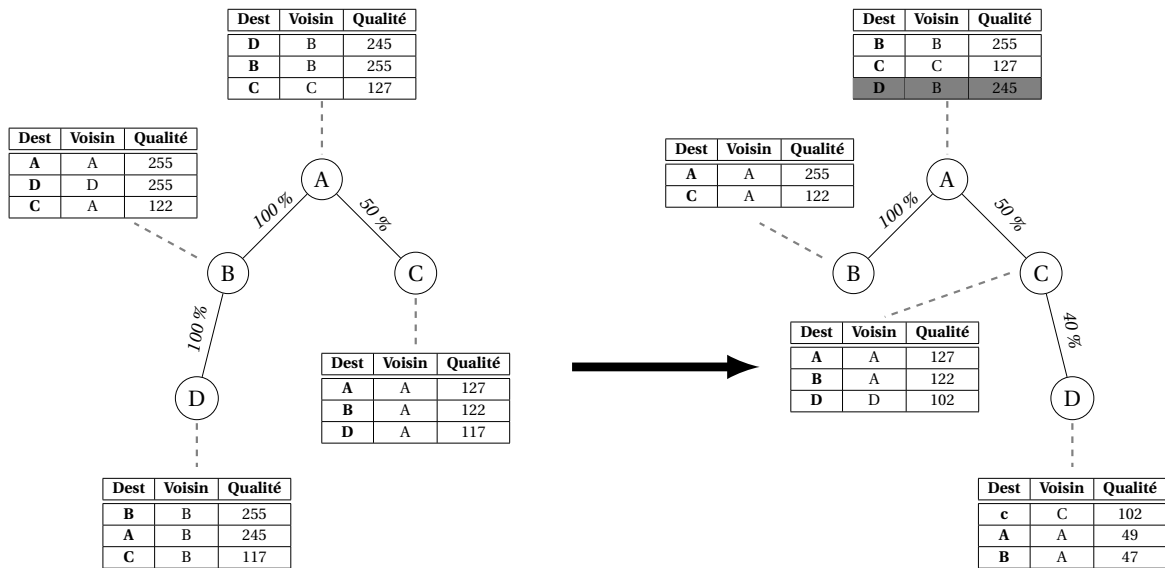


FIGURE 7.5 – Problème de sélection d'un chemin

Nous proposons trois mécanismes afin d'améliorer le processus de sélection d'un chemin lorsqu'un événement topologique survient. (i) Lorsque un chemin n'est plus annoncé, tous les nœuds stockant ce chemin dans leur table de routage font décroître sa qualité. (ii) Lorsqu'un chemin n'est plus annoncé au bout de deux périodes, l'entrée associée est supprimée de la table. (iii) Lorsqu'aucun chemin n'est disponible, les messages qui cherchent à l'emprunter sont sauvegardés au sein d'une file d'attente et traités par le protocole de routage DTN décrit dans la section suivante.

Pour conclure sur le routage MANET, nous présentons dans l'algorithme 6 le processus effectué par un nœud pour évaluer la qualité d'un chemin.

Algorithme 6 Calcul de la qualité du lien local

INPUT: paquet : paquet réceptionné

INPUT: addr : adresse du nœud

INPUT: table : table de routage

```

1: if (paquet.AddrOrig = paquet.AddrPrec) ∨ (paquet.AddrOrig = addr) then
2:   CalculQualiteLienLocal()                                ▷ Calcul de la qualité du lien local
3: else
4:   if (!table.CheminExist(addrOrig) ∨ table.Chemin(addrOrig).Qualité < paquet.qualité)
      then
5:     table.MajEntrée()                                     ▷ Met à jour l'entrée dans la table de routage
6:     paquet.qualité ←  $\frac{\text{paquet.qualité} \times \text{GetQualiteLienLocal}()}{255}$                                 ▷ Qualité du lien local
7:     paquet.qualité ←  $\frac{\text{paquet.qualité} \times 245}{255}$                                     ▷ Pénalité de saut
8:     paquet.AddrPrec ← addr
9:     Envoi(paquet)                                         ▷ Annonce le chemin
10:  else
11:    Supprimer(paquet)                                     ▷ Le chemin n'est plus annoncé
12:  end if
13: end if

```

Intégration de la métrique F-ETX

La métrique F-ETX décrite dans le chapitre 5 est composée de deux estimateurs de qualité et deux indicateurs d'état de lien : (i) un estimateur de qualité de lien à court terme, (ii) un estimateur de qualité de lien à long terme, (iii) un indicateur de stabilité de lien et (iv) un indicateur de lien

unidirectionnel. Les auteurs des métriques HoPS [REWT11] et de F-LQE [BKY⁺10] proposent de combiner les estimations afin d'en fournir une unique. Cette approche a été approfondie dans les travaux récents de Baccours et al. [BKYA15] dans lesquels les auteurs ont implémenté la métrique F-LQE au sein du protocole Collection Tree Protocol (CTP). Renner et al. [REWT11] observent toutefois, qu'il n'existe pas de solution optimale pour fusionner les différentes estimations.

Pour résoudre ce problème, nous proposons une nouvelle approche dans laquelle chaque estimateur est intégré dans le processus de routage. De cette manière, les estimateurs peuvent déclencher des comportements de routage spécifiques en fonction d'événements survenus sur un lien. Puisque la métrique F-ETX est basée sur une méthode de surveillance active du lien, chaque estimation est calculée périodiquement. Chaque information fournie est stockée dans la table de routage du nœud concerné afin de pouvoir être utilisée par le protocole. La figure 7.6 illustre l'interaction entre la métrique F-ETX et le protocole de routage.

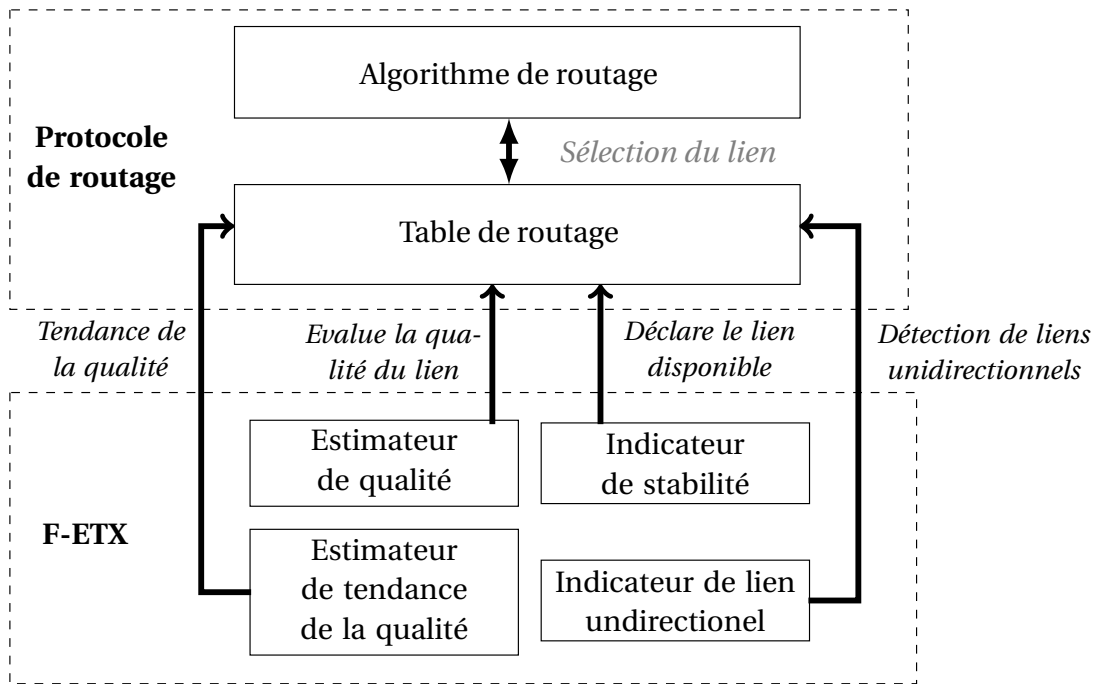


FIGURE 7.6 – Interaction entre F-ETX et le protocole de routage

La nature des informations sur la qualité et l'état d'un lien est composée de trois grands domaines. Le premier est l'évaluation de qualité qui est fournie par l'estimateur de qualité et de tendance de qualité. Le second est l'évaluation de la stabilité qui permet de déterminer si un lien est considéré comme utilisable. Le dernier est l'estimateur de l'état unidirectionnel d'un lien afin de déterminer les périodes transitoires et persistantes.

Évaluation de la qualité du lien. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 5, l'utilisation seule d'un indicateur de qualité à court terme ne permet pas d'obtenir suffisamment d'information pour pouvoir comparer deux liens entre eux. Nous proposons de combiner les estimateurs à court et à long terme de manière à moduler l'estimation de la qualité en fonction des tendances. De cette manière si deux qualités de lien relativement semblables doivent être comparées, l'information sur leurs tendances respectives permettra de sélectionner le meilleur sur le long terme. La qualité est alors donnée par :

$$\chi^{LQ} + \chi^{Trend}. \quad (7.4)$$

Stabilité du lien. L'indicateur de stabilité permet de déterminer si un lien est éligible pour transmettre de données. Nous avons observé dans le chapitre 5 que l'estimation donnée permet d'anticiper la coupure de lien en complément de l'estimateur de qualité. C'est pourquoi, cet estimateur

est utilisé pour déterminer si un lien local est valide. Nous considérons deux états possibles d'un lien :

- $\chi^{Stab} = 0$: route non valide,
- $\chi^{Stab} > 0$: route valide.

État unidirectionnel.

La présence d'un lien unidirectionnel ne permet la transmission des données dans les deux sens. L'estimateur a pour objectif de détecter les phases unidirectionnelles transitoires d'un lien. Les phases unidirectionnelles persistantes d'un lien sont détectées par l'observation de la probabilité d_f . Nous considérons deux états possibles d'un lien unidirectionnel :

- $\chi^{ULL} < 0$: état unidirectionnel transitoire,
- $d_f = 0$: état unidirectionnel persistant.

7.3.2 Extension du routage DTN

La politique de routage DTN que nous développons s'inspire du protocole tel que décrit dans le chapitre 6. Notre proposition se base sur l'algorithme d'apprentissage automatique Q-learning et utilise des fonctions de récompense basées sur le délai d'acheminement des données ainsi que sur la consommation énergétique des nœuds. Ce protocole a notamment à sa charge la gestion des files d'attente qui contiennent les messages à transmettre. Notre objectif est de pouvoir basculer entre les approches MANET et DTN en fonction de la topologie du réseau. Nous décrivons dans cette section les conditions nécessaires pour opérer ce basculement et plus généralement le comportement du protocole.

Apparition d'un chemin (DTN $\rightarrow$ MANET)

Les files d'attente maintenues par le protocole de routage permettent de stocker les paquets en attendant leur transmission. Comme il est décrit dans le chapitre 6, un algorithme d'ordonnancement est utilisé afin de gérer le nombre de paquets transmis à destination d'un nœud voisin. Nous étendons ce mécanisme afin de gérer les paquets à transmettre lorsqu'un chemin est présent entre deux nœuds dit connectés.

Lorsqu'un chemin est découvert entre deux nœuds, le protocole passe du mode DTN au mode MANET. La figure 7.7 illustre ce scénario où quatre nœuds évoluent sans être connectés et utilisent une politique de routage DTN. Lorsque les nœuds A, B et C se rapprochent, un chemin émerge entre eux. Lorsque deux nœuds sont directement connectés tous les paquets destinés à chacun sont envoyés, tandis que les autres paquets conservés dans les files d'attente de chacun sont transmis selon l'algorithme d'ordonnancement décrit dans le chapitre précédent.

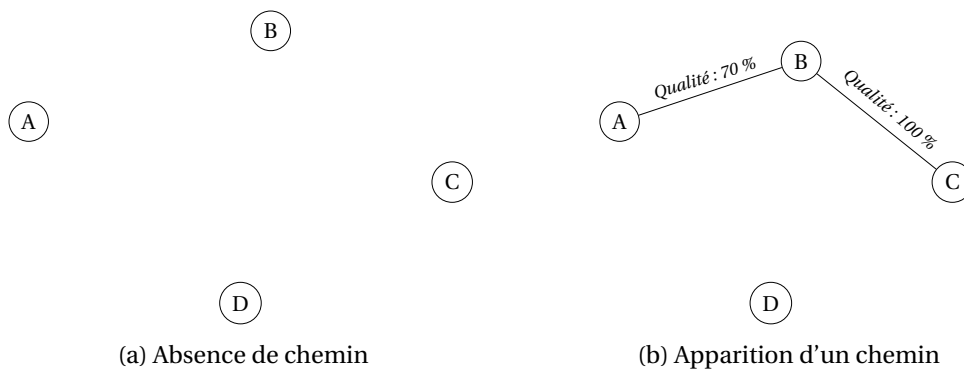


FIGURE 7.7 – Étude du scénario DTN vers MANET

De manière intuitive la découverte d'un chemin se propage de nœud en nœud au fur et à mesure de la réception des messages de contrôle. Dans notre exemple, le message envoyé par le

nœud C sera reçu en premier par le nœud B puis par le nœud A. Un nœud transmet en priorité les messages à destination des nœuds présents sur le chemin. Dans notre exemple le nœud A transmettra d'abord les paquets à destination de B puis de C, puisque c'est l'ordre dans lequel ils sont découverts. Lorsque les nœuds intermédiaires réceptionnent des paquets destinés à un nœud présent sur le chemin ceux-ci sont directement transmis. Toutefois, si le nœud ne possède plus d'entrée valide dans sa table, les paquets sont alors conservés dans une file d'attente associée au nœud destinataire.

Disparition d'un chemin (MANET → DTN)

Lorsqu'un chemin disparaît, seule une détection locale peut être faite par les nœuds concernés. En parallèle, les autres nœuds ayant connaissance de chemin décroient périodiquement sa qualité, puis suppriment l'entrée dans leur table de routage afin de ne plus le considérer comme valide. Les paquets à destination d'un nœud n'étant plus sur un chemin valide sont alors conservés dans une file d'attente associée au nœud destinataire et traités par l'algorithme de routage DTN.

7.3.3 Implémentation du protocole

Dans cette section nous détaillons le format des messages de contrôle utilisés ainsi que des tables de routage maintenues par le protocole.

Messages de contrôle

Le protocole de routage utilise deux types de messages. Le premier est envoyé périodiquement afin que le nœud puisse s'annoncer sur le réseau. Ce message est utilisé par le protocole de routage MANET pour évaluer la qualité des liens locaux et la qualité des chemins de bout en bout. Il est également utilisé par le protocole de routage DTN afin d'échanger les informations concernant la capacité énergétique du nœud ainsi que la valeur *V* utilisée pour l'algorithme d'apprentissage Q-learning, section 6.4 page 113. Le second message quant à lui peut être utilisé de deux manières. La première consiste à ajouter ce message aux données utiles transmises afin de diminuer le nombre de transmissions. La seconde consiste à envoyer directement ce message lorsque le nœud n'a pas de données à destination du nœud voisin.

Messages périodiques. Les messages de contrôle sont envoyés périodiquement par un nœud afin de se déclarer auprès de son voisinage. Ils permettent également d'évaluer la qualité et l'état d'un lien local et d'annoncer la présence d'un chemin. Ils sont aussi utilisés par le protocole DTN pour communiquer les informations utilisées par l'algorithme d'apprentissage. Le format de ce message est donné en figure 7.8.

0	7	15	39	47
Type	N° Séquence			Qualité
Addr Source				
Addr Trans				
Énergie	V			

FIGURE 7.8 – Protocole hybride MANET/DTN : format du message d'annonce

Le champ *Type* codé sur 8 bits indique le type de message de routage (ici fixé à 1). Le champ *N° Séquence* est codé sur 32 bits et représente le numéro de séquence et est attribué de manière unique afin de différencier les instances des messages. Le champ *Qualité* est codé sur 8 bits et indique la qualité du chemin annoncé, sa valeur est fixée à 255 lors de la création du message. Le champ *Addr source* est codé sur 48 bits et indique l'adresse MAC du nœud créateur du message. Le champ *Addr Trans* est codé sur 48 bits et indique l'adresse MAC du dernier transmetteur. Le

champ *Énergie* est codé sur 8 bits et indique le niveau d'énergie de ce nœud. Le champ *V* est codé sur 8 bits et contient la valeur *V* utilisée par l'algorithme Q-learning.

Métadonnées. Lorsqu'un nœud transmet des données, le protocole DTN y ajoute des métadonnées aux données utiles pour accélérer la convergence de l'algorithme Q-learning. Ces métadonnées permettent également aux nœuds de s'interroger mutuellement sur les délais d'acheminement afin de sélectionner dans les files d'attente les paquets à transmettre. Le format des métadonnées est donné en figure 7.9.

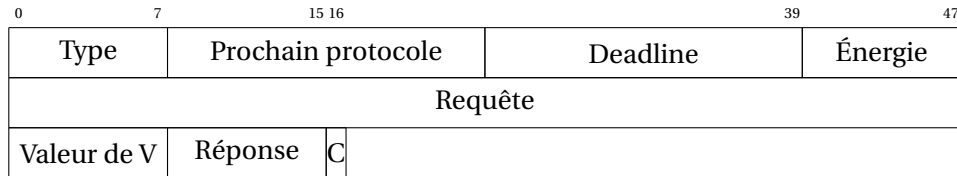


FIGURE 7.9 – Protocole hybride MANET/DTN : format des métadonnées

Le champ *type* codé sur 8 bits indique le type de message de routage (ici fixé à 2). Le champ *Prochain protocole* est codé sur 16 bits et permet de déterminer quel protocole de la couche supérieure encapsule les données utiles. Le champ *Deadline* codé sur 16 bits contient la durée de vie du paquet exprimée en seconde. Le champ *Énergie* est codé sur 8 bits et indique le niveau d'énergie du nœud émetteur du message. Le champ *Requête* codé sur 48 bits contient l'identifiant du nœud dont la fréquence de rencontre est demandée. Le champ *V* est codé sur 8 bits et contient la valeur *V* utilisée par l'algorithme Q-learning. Le champ *Réponse* codé sur 8 bits contient la réponse à la requête initié par le nœud voisin. Le champ *C* codé sur 1 bit indique s'il s'agit du message original ou bien d'une copie.

Lorsqu'un voisin initie une requête sur la fréquence de rencontre avec un nœud, le récepteur lui répond via le champ *Réponse* qui contient le délai de rencontre associé au nœud faisant l'objet de la requête du nœud voisin. Comme pour le protocole pour les réseaux sous-marins, ce champ contient soit une information sur la fréquence de rencontre ou bien le pourcentage de nœuds rencontrés. La figure 7.10 détaille la composition de ce champ.

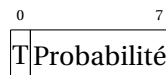


FIGURE 7.10 – Détail du champ Réponse

Tables de routage

Chaque nœud maintient deux tables afin de déterminer la route pour acheminer les données. La première est associée à l'algorithme de routage MANET et chacune des entrées est composée des champs suivants :

- *Adresse Destination* : Adresse MAC du nœud destinataire.
- *Adresse Voisin* : Adresse MAC du nœud voisin ayant annoncé le nœud destinataire avec la meilleure qualité.
- *Qualité* : Qualité annoncée par le nœud voisin.
- *Dernière Annonce* : Nombre de secondes écoulées depuis la réception dernier paquet d'annonce.

Une entrée est ajoutée dès qu'un nœud reçoit le message de contrôle d'un nœud voisin local ou présent sur un chemin. Une entrée est mise à jour si (i) la qualité du chemin annoncé change, (ii) si un nœud voisin annonce un chemin pour une destination présente dans la table avec une qualité supérieure ou (iii) si le champ annonce est modifié. Il est à noter que les champs *Qualité* et *Dernière annonce* changent périodiquement (chaque seconde dans notre implémentation). Une entrée est supprimée si (i) la valeur du champ *Qualité* est à zéro, (ii) ou si la valeur du champ

Dernière annonce est à deux (ce qui signifie que le chemin n'est plus annoncé au bout de deux périodes) ou si l'indicateur de stabilité déclare la route invalide.

La seconde table est utilisée par le protocole de routage DTN afin de stocker les valeurs des métriques; chaque entrée est composée des champs suivants :

- *Adresse Destination* : Adresse MAC du nœud destinataire.
- *Indicateur de rencontre* : Indique si le nœud a été rencontré et comptabilité pour le calcul du nombre moyen de nœuds rencontré, afin d'éviter le comptage multiple.
- *Métrique de rencontre à long terme* : Indique le nombre moyen de rencontres sur le long terme.
- *Métrique de rencontre récente* : Indique le nombre moyen de rencontres sur le court terme.
- *Métrique de rencontre indirecte* : Indique le nombre moyen de rencontres indirectes avec un nœud.

Chaque entrée contient donc cinq champs, un stockant l'adresse MAC du nœud rencontré, les quatre autres stockant les valeurs associées aux métriques. Une entrée est ajoutée dès qu'un nœud reçoit le message de contrôle d'un nœud voisin direct. Une entrée est mise à jour lorsque la valeur d'une métrique est modifiée. Afin de déterminer si une entrée doit être supprimée, un compteur est mis en place afin de déterminer la validité d'une entrée. Dans notre implémentation nous avons fixé la durée de validité d'une route à quarante cinq minutes.

7.4 Simulation et évaluation des performances

Nous évaluons les performances de notre protocole à travers deux scénarios. Chacun de ces deux scénarios permet d'évaluer les stratégies du protocole à savoir MANET et DTN. Nous définissons au sein de ces scénarios deux mobilités et deux propriétés de propagation du signal réalistes représentant deux milieux distincts. Le milieu en espace ouvert permet de représenter un environnement où les nœuds évoluent librement sur une zone où très peu d'obstacles sont présents. Cet environnement offre également des propriétés de propagation où le signal est peu perturbé. Dans le milieu urbain, les nœuds évoluent sur le réseau routier urbain et communiquent dans un milieu fortement perturbé.

7.4.1 Évaluation des protocoles MANETs

Dans cette section les performances des protocoles classiques OLSR, AODV ainsi que celles de ROGUE sont analysées selon deux critères. Le premier, le taux de paquets délivrés entre deux nœuds dit connectés, permet de déterminer le nombre de paquets perdus et délivrés. Le second est le délai d'acheminement qui permet de déterminer le temps de livraison d'un paquet (de bout en bout).

Deux résultats d'expériences menées sur l'impact du nombre de nœuds dans le réseau, ainsi que sur l'impact du débit généré par l'application sur les protocoles sont présentées ci-dessous. Dans la première nous faisons varier le nombre de nœuds, de vingt à cinquante en augmentant par pas de dix. Dans la seconde, nous faisons varier à la fois le nombre de nœuds (vingt et cinquante) et le débit de l'application. Ces deux expériences se déroulent conformément aux deux scénarios de simulation. Dans le premier scénario, les nœuds évoluent sur une zone de 1km^2 avec une vitesse de 70km/h et suivent une mobilité de type RandomWaypoint. Dans le second scénario, les nœuds suivent une mobilité de type ManhattanGrid dans une zone urbaine de 1km^2 avec une vitesse moyenne de 50km/h et minimale de 30km/h . Les paramètres du simulateur en termes de propriétés de propagation du signal et des caractéristiques des interfaces réseaux sont données dans le tableau 7.1.

Concernant la reproductibilité des simulations, chacune est reproduite trois fois avec une valeur de variable aléatoire différente utilisée dans les modèles de propagation. Cette variable est utilisée par le modèle de propagation afin de calculer des atténuations stochastiques du signal. Le tableau 7.2 donne les valeurs de la variable aléatoire pour chaque simulation.

TABLEAU 7.1 – Paramètres du simulateur ns-3 pour les scénarios MANET

	1 ^{er} scénario (RandomWaypoint)	2 nd scénario (Manhattan)
Paramètres PHY		
Puissances Tx/Rx (dbm)	0	0
Gain antennes (dB)	0	0
Puissance de détection (dbm)	-96	-96
Paramètres MAC		
Standard	802.11g	802.11g
Débit	6 Mpb	6 Mpb
Adaptation de débit	ARF	ARF
Paramètres des modèles de propagation		
Shadowing	Friis Fréquence : 2.4GHz	ThreeLogDistance d0 : 1, d1 : 75, d2 : 114 exp0 : 2.5, exp1 : 5, exp2 : 10
Fast-fading	Nakagami m0 : 1.5, m1 : 0.75, m2 : 0 d1 : 80, d2 : 320	Rayleigh

TABLEAU 7.2 – Variable aléatoire des simulations des réseaux MANETS

Simulation	Variable aléatoire (Seed)
1	5155236
2	5236
3	60

Impact du nombre de nœuds

Afin de déterminer le taux de paquets reçus et le délai d'acheminement, nous faisons communiquer les nœuds entre eux avec une application UDP générant des données avec un débit constant. L'application génère périodiquement soixante quatre octets de données utiles. Dans le scénario en espace libre six trafics sont analysés durant toute la durée de la simulation ce qui représente un volume de 6912 octets de données utiles. Dans le second scénario, nous analysons quatre trafics où 2688 octets de données sont échangés.

Taux de paquets délivrés. Le taux de paquets délivrés (PDR) est le ratio entre le nombre de paquets envoyés et le nombre de paquets reçus. Il permet d'observer les pertes des paquets et donc la capacité du protocole à acheminer les données. La figure 7.11 montre le taux moyen de paquets délivrés pour les deux scénarios. Le protocole ROGUE affiche de meilleures performances que les protocoles AODV et OLSR et ce dans les deux scénarios. Le nombre de nœuds influe fortement sur les performances de ces deux protocoles, puisque OLSR est plus performant lorsque la densité des nœuds augmente, tandis que la relation est inversée pour AODV. Le protocole ROGUE quant à lui affiche des performances similaires quelle que soit la densité du réseau. Les propriétés

de l'environnement influençant la physique de la propagation du signal ont également un effet significatif sur les performances de AODV et OLSR puisque celles-ci se dégradent considérablement dans l'environnement urbain. En revanche, le changement d'environnement impact peu les performances du protocole ROGUE. Il est important de remarquer que l'erreur standard est plus élevée pour les protocoles OLSR et AODV et ce dans les deux scénarios, puisque le changement de la valeur de la variable aléatoire influence la qualité des chemins résultants. Étant donné que le protocole ROGUE se base sur un estimateur de qualité de lien, celui-ci est plus apte à choisir un chemin en fonction de sa qualité ce qui a pour effet d'améliorer de façon stable le taux moyen de paquets délivrés.

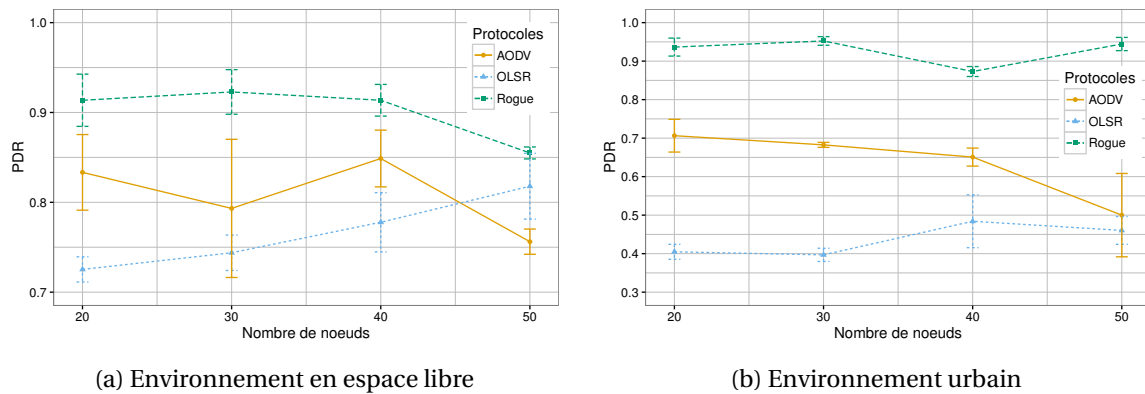


FIGURE 7.11 – Taux de délivrance moyen en fonction du nombre de nœuds (MANET)

Délai d'acheminement. Le délai d'acheminement permet d'observer le temps de livraison des paquets et donc la capacité des protocoles à délivrer au plus tôt les données. La figure 7.12 illustre les délais d'acheminement des protocoles OLSR, AODV et ROGUE. Le protocole AODV étant réactif, il détermine le chemin lors de l'envoi des données ce qui introduit un délai supplémentaire. On remarque dans le scénario urbain, pour lequel les pertes sont plus importantes, que la convergence du processus de découverte des routes de AODV est plus longue. Les protocoles OLSR et ROGUE sont proactifs et déterminent donc les routes avant l'envoi des données. De ce fait ils possèdent des délais d'acheminement plus faibles et similaires entre eux. Dans le scénario urbain ce délai d'acheminement est plus important puisque les pertes introduites par le milieu imposent la retransmission des trames.

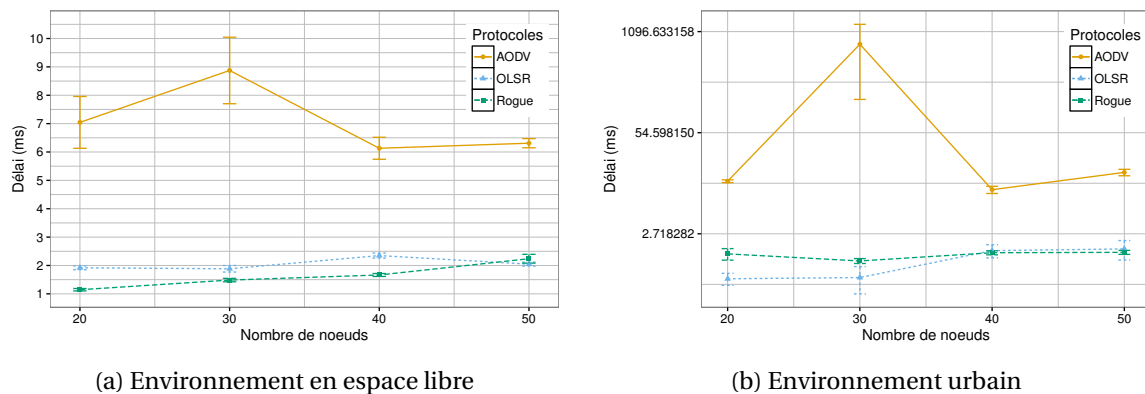


FIGURE 7.12 – Délai moyen en fonction du nombre de nœuds (MANET)

Impact du débit applicatif

L'objectif de cette expérience est de montrer les performances des protocoles de routage en fonction du taux d'utilisation des liens. Dans le premier scénario nous faisons varier le débit ap-

plicatif entre 1 paquet/s et 4 paquets/s avec pour résultat un échange qui varie de 13824 à 34624 octets de données. Dans le second scénario nous faisons varier le débit applicatif de manière à ce qu'un paquet est généré tous les 600, 300 et 150 ms. Les échanges de données entre les nœuds se situent donc entre 8064 et 20160 octets de données.

Taux de paquets délivrés. La figure 7.13 montre la moyenne des taux de paquets délivrés pour les deux scénarios. Le protocole ROGUE se montre le plus performant quelque soit le scénario, le nombre de nœuds et le débit applicatif. Il offre un taux de paquets délivrés supérieur à 80% quel que soit le scénario. Ces performances sont toutefois plus faibles lorsque le milieu de propagation est favorable et que le nombre de nœuds est important. Ce comportement s'explique par le nombre important de messages de sonde échangés entre les nœuds qui a pour conséquence d'augmenter le nombre de transmissions et donc le nombre de collisions. Dans les autres scénarios le nombre de messages de sonde est limité soit par le nombre de nœuds présents dans le réseau soit par les propriétés de propagation du milieu qui dégradent fortement le signal (milieu urbain). Le débit applicatif influence donc les performances du protocole, mais tout en restant supérieures comparées à celles de AODV et OLSR.

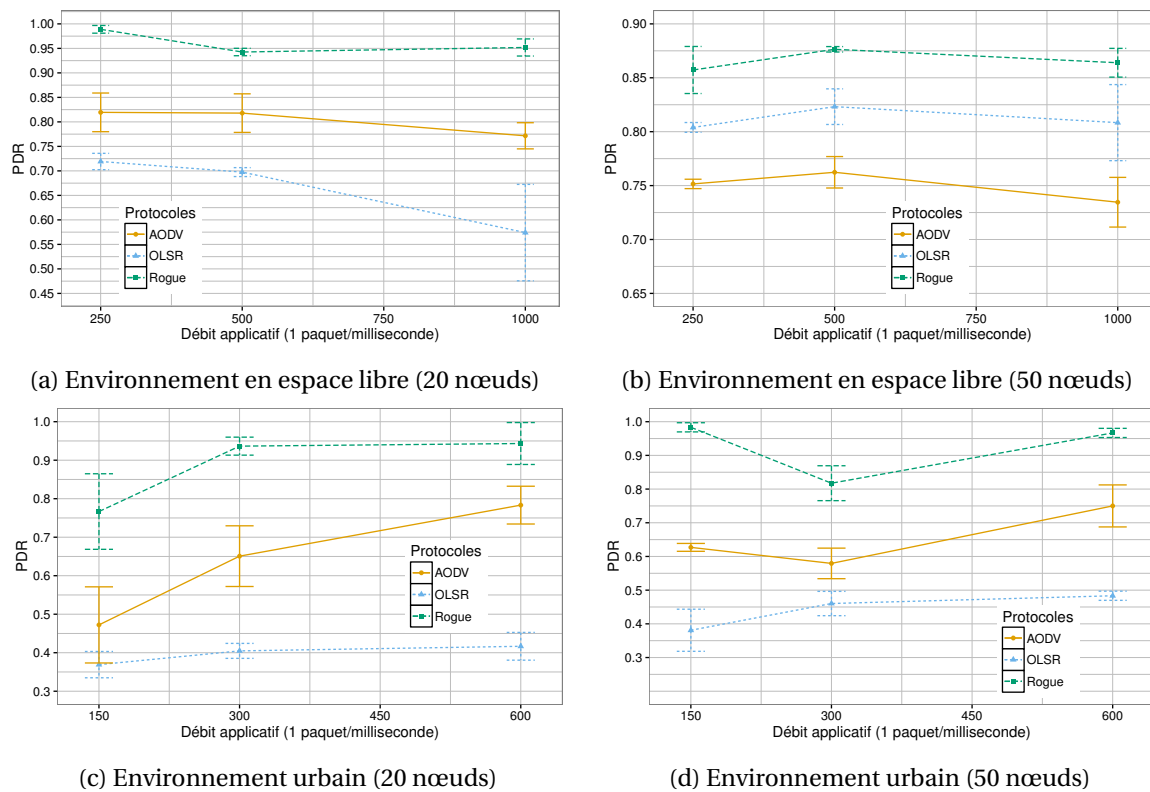


FIGURE 7.13 – Taux de délivrance moyen en fonction du débit applicatif (MANET)

Délai d'acheminement. La figure 7.14 montre les délais d'acheminement de bout en bout pour le scénario en espace libre et pour le scénario en zone urbaine. On peut observer que le protocole ROGUE se montre le plus performant dans le scénario en espace libre. En revanche dans le scénario urbain ses performances sont proches de celles du protocole OLSR. Le protocole AODV est le protocole qui présente les délais d'acheminement les plus élevés, ce qui est dû au fait que le mécanisme de découverte des routes retarde la transmission des paquets. Les protocoles OLSR et ROGUE étant basés sur un mécanisme proactif, ils fournissent une information de routage plus tôt ce qui permet de réduire le délai d'acheminement.

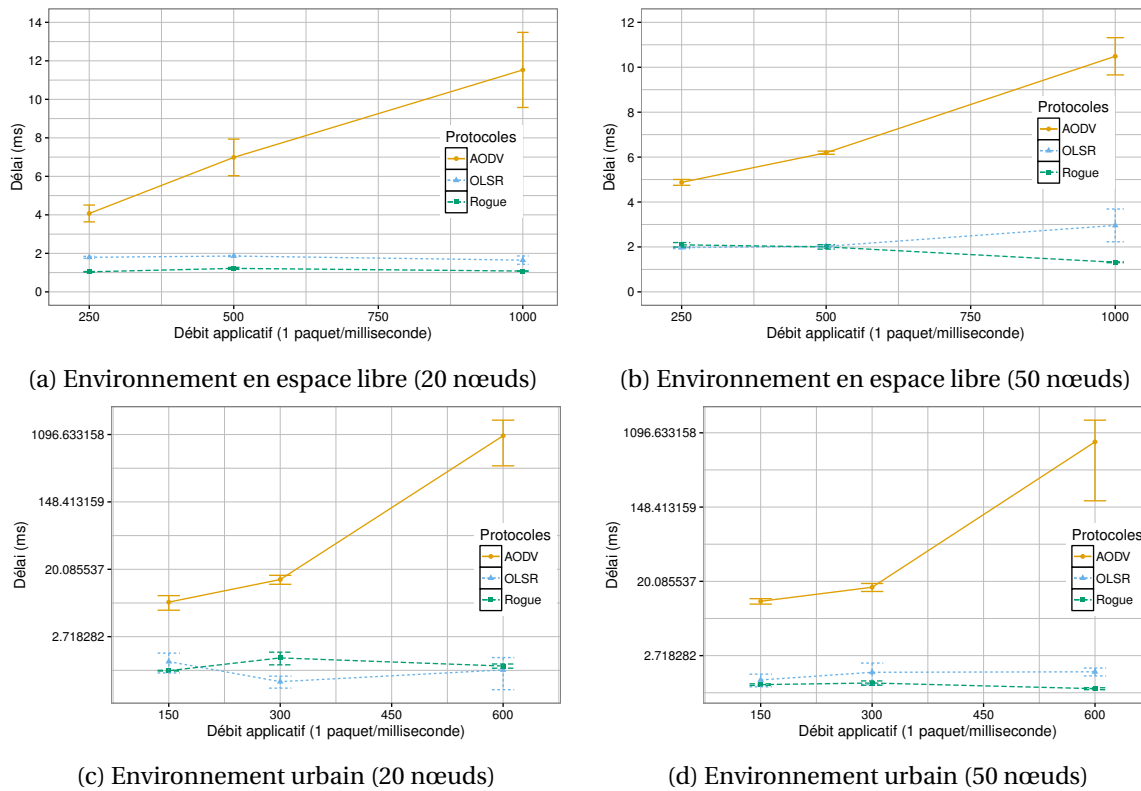


FIGURE 7.14 – Délai moyen d’acheminement de bout en bout en fonction du débit applicatif (MANET)

7.4.2 Évaluation des protocoles DTN

Dans cette section nous comparons les performances de notre protocole ROGUE à celles des protocoles de type Spray-and-Wait avec nombre de réplique limité (fixé à trois) et avec un nombre illimité de répliques. Nous évaluons les performances de ces protocoles à partir du taux de paquets délivrés et du délai d’acheminement. Les scénarios et environnements de simulation utilisés sont identiques à ceux considérés pour l’évaluation des protocoles MANET.

Impact du nombre des nœuds

Nous nous intéressons ici à l’impact du nombre de nœuds sur le taux de paquets délivrés ainsi que sur le délai d’acheminement. Pour cela nous générons soixante quatre octets de données, via une application UDP générant des données avec un débit constant. Dans les deux scénarios quatre trafics sont analysés sur une durée d’une heure avec un volume de données utiles échangées de 16512 octets.

Taux de paquets délivrés. La figure 7.15 montre les taux moyens de paquets délivrés pour les deux scénarios. Le protocole ROGUE obtient les meilleures performances dans les deux scénarios comparées aux deux autres protocoles DTN, avec un taux de paquets délivrés supérieur à 90%. Par ailleurs, ce taux est stable quelque soit le nombre de nœuds déployés dans le réseau. On remarque également que l’environnement joue un rôle puisque dans l’environnement urbain, les performances de ces deux protocoles sont plus faibles que dans l’environnement en espace libre.

Délai d’acheminement. La figure 7.16 illustre les délais d’acheminement obtenus au cours des simulations. Le protocole ROGUE qui est basé sur une transmission sélective des données permet de réduire le délai d’acheminement de manière intelligente et donc d’obtenir un résultat satis-

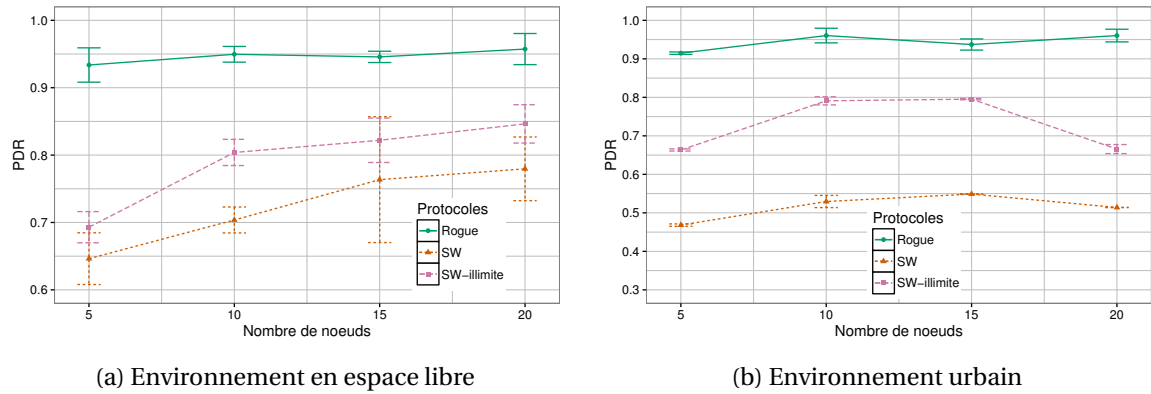


FIGURE 7.15 – Taux de paquets délivrés en fonction du nombre de nœuds (DTN)

faisant. Toutefois, le protocole Spray-and-Wait avec un nombre illimité de répliques présente des performances similaires voire supérieures lorsque le nombre de nœuds augmente. En effet, celle-ci permet de copier un message de manière illimitée ce qui permet de réduire considérablement le délai d'acheminement. Toutefois, cette approche ne permet pas de maximiser le PDR, car elle présente l'inconvénient de surcharger la mémoire des nœuds, contrairement à notre protocole ROGUE.

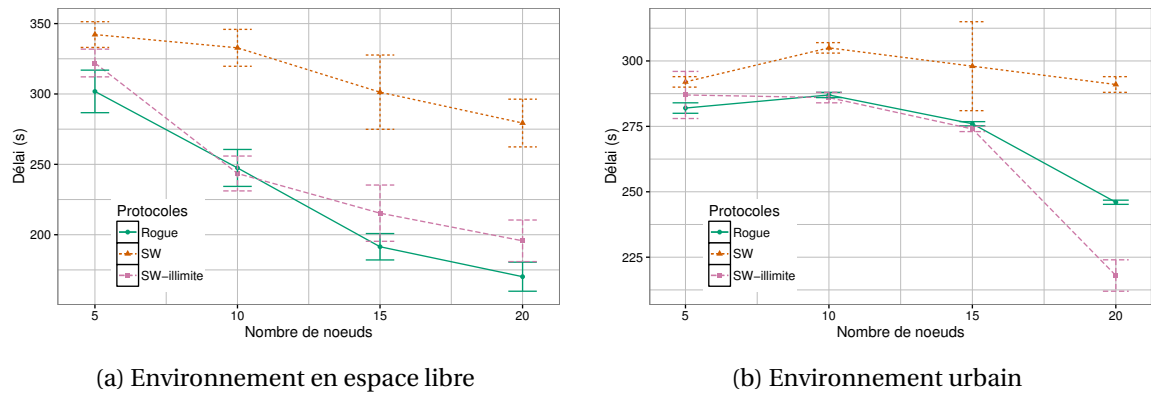


FIGURE 7.16 – Délai moyen en fonction du nombre de nœuds (DTN)

7.4.3 Évaluation des deux approches

Dans cette section nous finalisons notre évaluation en comparant les performances des protocoles MANET (OLSR, AODV), celles des protocoles DTN (Spray-and-Wait avec nombre de copies limitées et illimitées) et notre protocole (ROGUE) qui combine une approche MANET et DTN.

Impact du nombre des nœuds

Nous évaluons l'impact du nombre de nœuds dans le réseau sur les performances de routage en terme de taux de paquets délivrés et de délai d'acheminement. Pour cela nous générons soixante quatre octets de données, via une application UDP générant des données avec un débit constant. Dans les deux scénarios quatre trafics sont analysés sur une durée d'une heure avec un volume de données utiles échangées de 16512 octets.

Taux de paquets délivrés. La figure 7.17 montre les taux moyens de paquets délivrés pour les deux scénarios. On observe que le protocole ROGUE possède le meilleur taux de paquets délivrés dans les deux scénarios. On remarque que les protocoles de routage conçus pour les MANET obtiennent de bonne performance dans le scénario en espace libre et quand le nombre de nœuds est

important. Lorsque le nombre de nœud est faible ou que l'environnement génère plus de perturbation (milieu urbain) les protocoles de type DTN présentent de meilleures performances.

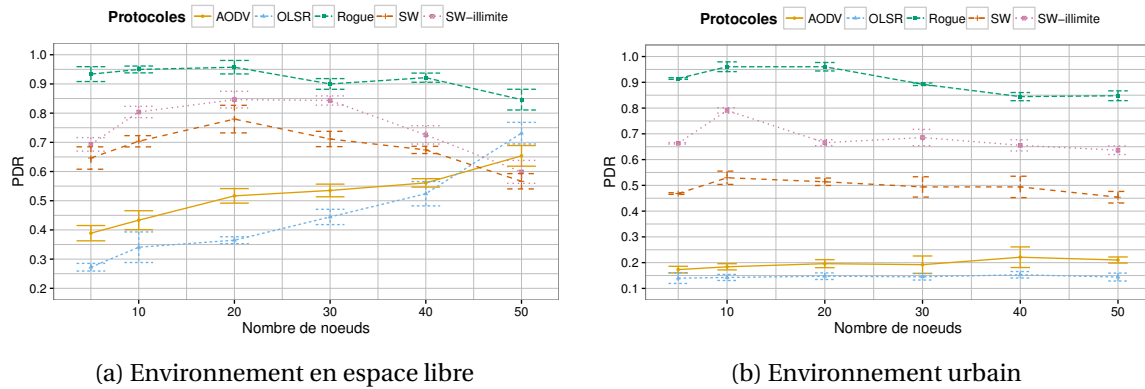


FIGURE 7.17 – Taux de paquets délivrés en fonction du nombre de nœuds (MANET/DTN)

Délai d'acheminement. La figure 7.18 illustre les délais moyens d'acheminement pour les deux scénarios. Le protocole ROGUE qui utilise une technique de transmission directe et tolérante au délai permet d'avoir un délai d'acheminement réduit par rapport aux protocoles tolérants aux délais. On remarque que dans le scénario en espace libre, le délai d'acheminement du protocole ROGUE est plus faible que dans le scénario urbain. Cette différence s'explique par l'augmentation du nombre de paquets transmis directement à la destination.

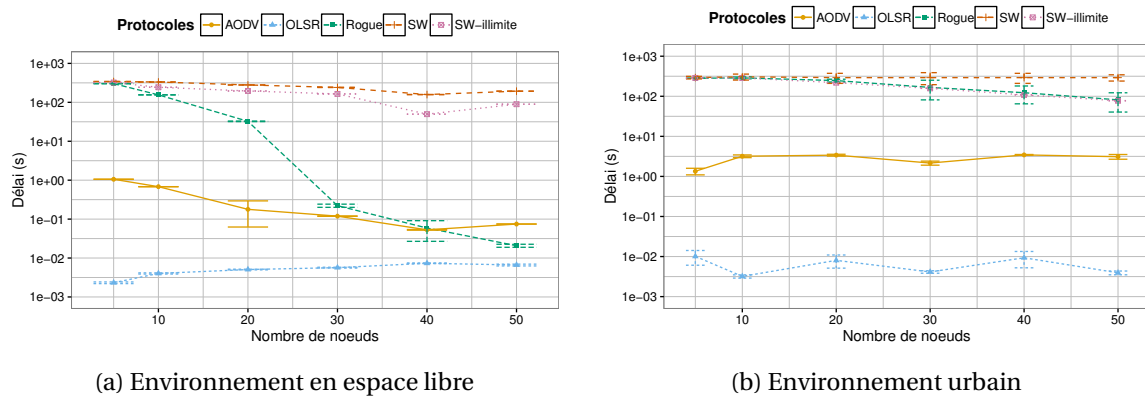


FIGURE 7.18 – Délai d'acheminement en fonction du nombre de nœuds (MANET/DTN)

7.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le protocole de routage que nous avons développé et nommé ROGUE conçu ici pour les réseaux terrestres. Il possède la particularité de combiner une technique de routage MANET et DTN qui est utilisée en fonction de la topologie du réseau. Nous avons vu que l'approche adoptée nous permet d'obtenir des résultats en termes de paquets reçus et de délai d'acheminement meilleurs que ceux des autres protocoles. Les protocoles développés jusqu'ici dans cette thèse acheminent des données dans les réseaux sous-marins et terrestres. Cependant, ils ne permettent pas d'acheminer des données entre ces deux réseaux. Ce point fait l'objet du prochain et dernier chapitre de ce manuscrit de thèse.

Chapitre 8

Modèle de groupe et routage anycast

*« We can only see a short distance ahead,
but we can see plenty there that needs to be
done. »*

Alan Turing

Sommaire

8.1 Introduction	143
8.2 Modèle et routage	144
8.2.1 Format des identifiants des groupes	145
8.2.2 Notations associées au modèle	145
8.2.3 Modélisation du protocole de routage	146
8.2.4 Détails techniques	150
8.3 Interopérabilité avec le protocole IP	151
8.3.1 Le protocole IPv4	151
8.3.2 Le protocole IPv6	153
8.4 Simulation et évaluation	156
8.5 Conclusion	158

8.1 Introduction

Le déploiement d'un réseau doit permettre aux différents systèmes autonomes de communiquer entre eux quel que soit le milieu et la mobilité des engins concernés. Nous avons décrit dans les chapitres précédents deux protocoles de routage. Le premier est dédié aux réseaux mobiles sous-marins et peut être déployé sur n'importe quel véhicule mobile et n'utilise aucune information de localisation. Le second est dédié aux réseaux terrestres qui incluent les engins aériens, terrestres et marins de surface et achemine des données en combinant une technique d'acheminement direct et tolérante aux délais. Toutefois ces deux protocoles ne prennent pas en compte la notion de passerelle afin que les engins sous-marins et les engins terrestres puissent communiquer. Nous avons observé que les engins autonomes fournissaient un service associé à la mission qu'ils réalisaient. Il est donc possible de regrouper au sein d'un seul groupe les engins de même type qui réalisent une mission identique. De cette manière, une information n'est plus diffusée à une entité unique et identifiée mais à une entité faisant partie d'un groupe.

Dans ce chapitre nous décrivons les extensions apportées au protocole ROGUE, afin qu'il supporte l'acheminement des données entre les groupes et qu'il gère la présence de plusieurs inter-

faces physiques sur un même véhicule. Notre démarche s'appuie sur une observation du chapitre 1 qui est que les systèmes sont orientés mission, autrement dit que leur conception dépend de la mission assignée. Nous avons également remarqué que l'accomplissement d'une mission globale est la conséquence de la réalisation de missions individuelles (locales) effectuées par chaque type de véhicule. Nous considérons qu'un véhicule est donc caractérisé par le milieu où il évolue et par les missions qui lui sont assignées. Nous proposons en conséquence un plan d'adressage qui segmente le réseau de systèmes autonomes en fonction des différents types d'engins qui le composent. Les données peuvent être transmises à une entité quelconque faisant partie d'un groupe cible, ce qui correspond au concept d'anycast. Afin de supporter ce mode d'acheminement des données, nous apportons des modifications aux protocoles de routage développés. Enfin, nous proposons deux schémas d'adressage qui exploitent ce mode d'acheminement, l'un basé sur IPv4 et le second basé sur IPv6 et présentons les avantages et inconvénients associés.

Ce chapitre est organisé en trois parties. La première partie détaille les modifications apportées aux algorithmes de routage afin de prendre en compte la notion de groupe, l'acheminement des données en anycast et le support d'interfaces physiques multiples. La seconde partie décrit les solutions pour permettre de rendre interopérable le protocole de routage avec la couche IP. La troisième partie présente les résultats obtenus à partir de scénarios réalistes faisant intervenir des véhicules aériens, terrestres et marins (de surface et sous-marins).

8.2 Modèle et routage

Nous considérons un ensemble comme un groupe incluant des véhicules de même nature qui accomplissent une mission identique. Chaque groupe fournit un service associé à la mission à réaliser. Cette propriété nous permet de segmenter un réseau en fonction des ensembles que nous considérons, comme le montre la figure 8.1 où chacun est représenté par une zone colorée. Dans cette configuration, un message est alors diffusé non pas d'un véhicule à un véhicule (diffusion en unicast) mais d'un véhicule à n'importe quel véhicule faisant partie d'un groupe (diffusion en anycast). Les protocoles de routage que nous avons décrits dans les chapitres 6 et 7 permettent uniquement d'acheminer des données entre deux véhicules distincts. Nous leur apportons donc des modifications afin qu'ils intègrent la notion de groupe. Dans un premier temps nous proposons un format d'identifiant afin d'adresser chaque groupe. Nous détaillons ensuite les modifications apportées aux protocoles et utilisons le formalisme ADAGRS [Lap12] pour appuyer notre démarche. Enfin, nous décrivons les modifications apportées aux implémentations.

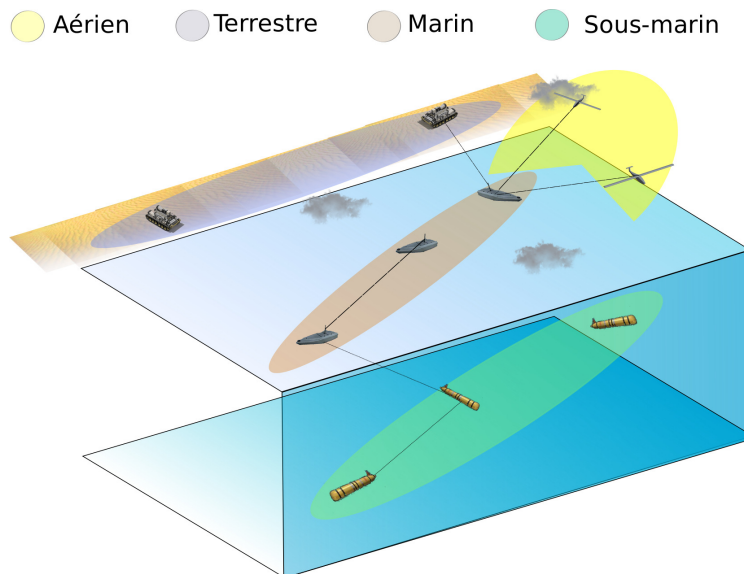


FIGURE 8.1 – Segmentation du réseau des systèmes autonomes

8.2.1 Format des identifiants des groupes

Notre objectif est de concevoir des identifiants afin que chaque groupe se voit attribuer un identifiant unique, partagé par l'ensemble des véhicules associés. Ces identifiants prennent en compte la propriété multiniveau des engins, qui fait référence à leur capacité à évoluer à différentes "altitudes". On distingue quatre niveaux hiérarchiques que nous détaillons dans le tableau 8.1, chacun est associé à un type unique d'engin. De manière intuitive cette hiérarchie permet de déterminer le sens de diffusion d'un message, en le transmettant soit au niveau supérieur (vers le haut), soit au niveau inférieur (vers le bas), soit au même niveau.

TABLEAU 8.1 – Identifiant multiniveau des engins

Identifiant multiniveau	Types de systèmes
4	Aériens
3	Terrestres
2	Marins de surface
1	Sous-marins

Nous considérons qu'un groupe doit pouvoir être identifié à la fois par son niveau hiérarchique et par les propriétés des engins qui le composent. Nous faisons donc le choix de construire les identifiants de groupes à partir de deux informations. Le premier est l'identifiant multiniveau qui est codé sur trois bits afin d'adresser les quatre niveaux hiérarchiques ($2^3 - 2$ adresses disponibles¹). Le second, l'identifiant de sous-groupe doit être attribué de manière unique au sein d'un même niveau hiérarchique. Nous faisons le choix de le coder sur cinq bits de façon à adresser un nombre supposé important de sous-groupes (2^5 sous-groupes disponibles pour chaque niveau hiérarchique). On dénombre alors au total 128 groupes adressables. Les trois premiers bits de l'identifiant de groupe (incluant le bit de poids fort) sont alloués à l'identifiant multiniveau, tandis que les bits restants (incluant le bit de poids faible) sont alloués à l'identifiant du sous-groupe, figure 8.2. De manière intuitive, pour comparer le niveau entre deux groupes, il suffit d'une simple comparaison des identifiants de groupe.

Identifiant multiniveau (3 bits)

X X X Y Y Y Y Y

Identifiant sous-groupe (5 bits)

FIGURE 8.2 – Format de l'identifiant de groupe

8.2.2 Notations associées au modèle

Afin de décrire les modifications que nous portons au protocole, nous décrivons dans cette section les notions et notations formelles associées. Nous distinguons dans notre modèle deux événements liés aux applications, le premier est initié par l'application de routage (définition 1) et le second concerne l'ensemble des éléments liés aux autres applications (définition 2).

Définition 1. *Un événement de routage est le déclencheur de la création d'un message de routage qu'une entité doit transmettre.*

Définition 2. *Un événement applicatif est le déclencheur de la création d'une information qu'une entité doit transmettre à un groupe.*

1. La première et la dernière plages sont exclues afin de les réserver à une utilisation future telle que les groupes temporaires

Les événements sont générés par les applications en fonction d'un ensemble de conditions liées à l'environnement considéré. La survenue d'un événement entraîne la production d'un message véhiculant une ou plusieurs informations. Par analogie aux événements nous distinguons deux types de messages, le premier est lié aux événements de routage (définition 3), le second est associé aux autres applications (définition 4). Nous considérons qu'un message de routage est diffusé soit à tous les nœuds voisins soit à un nœud unique. C'est pourquoi un message de routage peut être décrit par un 1-uplet, a contenant l'identifiant du nœud destinataire du message de routage. Les messages applicatifs quant à eux doivent être acheminés à un membre d'un groupe (anycast). Lorsqu'une donnée est générée, une date d'échéance est fixée par l'application. Cette information est utilisée par l'algorithme de routage afin de déterminer la priorité de transmission du message associé. Une donnée est donc décrite par un 2-uplet contenant deux valeurs $\{a, d\}$, où a est l'identifiant de groupe destinataire et d la date d'échéance.

Définition 3. *Un **message de routage** est une liste d'informations élémentaires liées au routage que doit traiter une entité, généré suite à la survenue d'un événement de routage.*

Définition 4. *Un **message applicatif** contient une liste d'informations élémentaires que doit traiter une entité destinataire et généré à la suite d'un événement applicatif.*

Nous considérons que les messages générés peuvent être traités par n'importe quel type d'entité autonome, à savoir sous-marine, marine, terrestre et aérienne. Nous avons montré dans les chapitres 6 et 7 que nous considérons deux familles distinctes de systèmes. La première regroupe l'ensemble des engins sous-marins, qui utilisent uniquement une approche tolérante aux délais afin d'acheminer les données et que nous définissons en 5. La seconde regroupe l'ensemble des entités exceptées les entités sous-marines, qui combinent une approche de routage directe et tolérante aux délais telle que définie en 6.

Définition 5. *Une entité dite **tolérante aux délais** est capable de stocker une donnée dans l'attente d'une transmission ultérieure.*

Définition 6. *Une entité dite **hybride** est capable soit de transmettre directement une donnée soit de la stocker dans l'attente d'une transmission ultérieure.*

8.2.3 Modélisation du protocole de routage

Tout au long de la mission effectuée, les entités (quel que soit le type) doivent fournir un service d'acheminement des données, afin d'assurer le bon déroulement de la mission exécutée. Nous décrivons dans cette section les modifications apportées aux algorithmes de routage et aux mécanismes associés. Nous appuyons notre démarche en utilisant le formalisme ADAGRS [Lap12] qui est basé sur le ré-étiquetage de graphes et les notations introduites dans la section précédente.

Nous considérerons dans un premier temps l'étiquetage minimal suivant qui prend en compte le type associé au nœud (tolérant aux délais ou hybride), son identifiant de groupe et son identifiant unique :

$$\{< Type >, < ID groupe >, < ID sommet >\}.$$

Un sommet tolérant aux délais ($Type \leftarrow T$), étiqueté $\{T, i, j\}$ est représenté selon la figure 8.3a, tandis qu'un sommet hybride ($Type \leftarrow H$), étiqueté $\{H, i, j\}$ est représenté selon la figure 8.3b. Nous considérons que les véhicules sous-marins assurent exclusivement un service d'acheminement des données tolérant aux délais, tandis que les autres véhicules assurent un service d'acheminement hybride (direct ou tolérant au délai). Afin de suivre le formalisme de ADAGRS, un élément de l'étiquetage qui n'est pas important pour une règle exprimée est remplacée par un '-' et lorsqu'il n'est pas connu avant ou après une modification, il est représenté par un '?'.



FIGURE 8.3 – Représentation des sommets

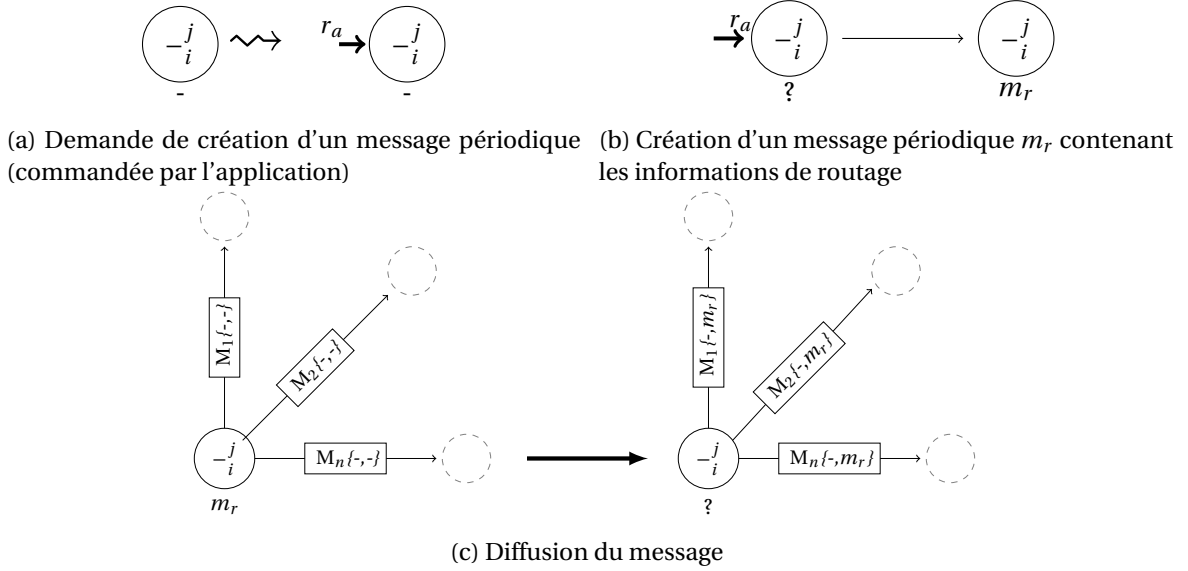


FIGURE 8.4 – Annonce du sommet à son voisinage

Annonce d'un sommet

Afin que chaque nœud puisse être découvert, l'application de routage déclenche périodiquement un événement d'annonce comme le montre la figure 8.4. Le message (m_r) est diffusé à l'ensemble du voisinage afin que les sommets prennent acte de cette annonce. Nous étendons donc l'étiquetage précédent en ajoutant un champ concernant les messages à transmettre :

$$\{< Type >, < ID\ groupe >, < ID\ sommet >, < Msg >\}.$$

La périodicité d'envoi des messages est définie par l'application de routage, en fonction du type du nœud. Comme nous l'avons décrit dans les chapitres 6 et 7, lorsque l'application est attachée aux nœuds hybrides un message est créé chaque seconde, tandis que les applications attachées aux nœuds tolérants aux délais créent un message toutes les deux secondes. Une fois le message réceptionné, celui-ci est consommé et le nœud met à jour ses tables de routage. En conséquence, nous étendons l'étiquetage avec un nouveau champ nommé R qui correspond à l'état des informations relatives au routage. La mise à jour de ces informations est notée par l'étiquette $maj(R)$. Le format de l'étiquetage devient :

$$\{< Type >, < ID\ groupe >, < ID\ sommet >, < R >, < Msg >\}.$$

Lors de la réception d'un message de routage par l'application, représentée figure 8.5, deux cas de figures se présentent en fonction du type de routage utilisé à savoir tolérant au délai ou bien hybride. Pour chacune de ces stratégies nous détaillons les changements apportés aux algorithmes.

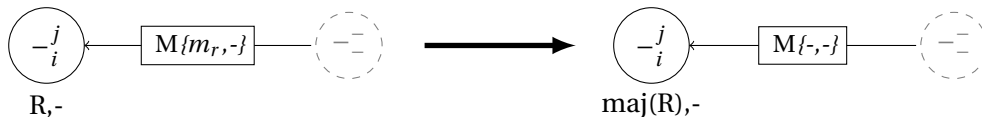


FIGURE 8.5 – Réception et mise à jour des informations de routage

Adaptation de l'algorithme de routage tolérant aux délais

Lorsque le nœud est tolérant aux délais, la réception d'un message émis périodiquement déclenche la mise à jour des métriques d'occurrences de rencontre mais également des informations utilisées par l'algorithme d'apprentissage. Dans le chapitre 6 nous avons basé nos métriques d'évaluation d'occurrences de rencontres sur les identifiants des nœuds. Afin de permettre au protocole de prendre en compte les occurrences de rencontre avec un groupe, nous modifions la méthode de comptage associée aux métriques. La métrique ρ qui évalue le pourcentage de nœuds rencontrés reste inchangée, toutefois les trois autres métriques sont modifiées. La première, la métrique à long terme $Plg^{u,v}$ calcule le nombre moyen de rencontre sur le long terme entre le nœud (u) et un groupe voisin (v). La seconde, la métrique $Pr^{u,v}$ calcule le nombre moyen de contacts à court terme entre un nœud (u) et un groupe voisin (v). Enfin la dernière, la métrique de rencontre indirecte $Pi^{u,v}$ est calculée à partir des occurrences de rencontres indirectes avec un groupe voisin.

Nous avons décrit dans le chapitre 6 un mécanisme de file d'attente où chaque file était dédiée à un nœud destinataire. Nous modifions ce mécanisme afin qu'une file d'attente soit allouée non plus à un nœud spécifique mais à un groupe. Par conséquent, l'algorithme d'ordonnancement détermine la priorité de transmission des paquets associés à un groupe et non plus à un nœud. Si un nœud rencontre un groupe autre que celui auquel il appartient et qu'il possède des données à destination de ce groupe, l'application initie une phase de transmission des données. Elle ajoute à ces données des métadonnées de routage, comme nous l'avons défini dans le chapitre 6. Par conséquent, lorsqu'un message contenant des données (m_d) doit être transmis, un message contenant des métadonnées de routage (m_{md}) y est attaché, alors $m_d \oplus m_{md}$ représente le message envoyé suite à l'événement (r_d) tel que représenté figure 8.6.

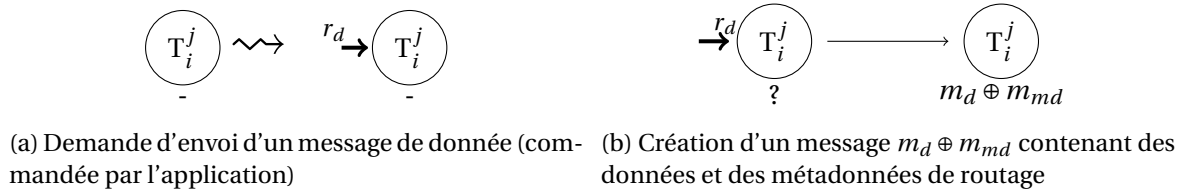


FIGURE 8.6 – Demande de transmission d'un message d'information

Toutefois, comme nous l'avons spécifié dans le chapitre 6, si le nœud ne possède aucune donnée à destination du groupe voisin, il initie une phase de requête afin de déterminer si le temps de rencontre du nœud voisin avec les groupes destinataires est plus court. Pour cela l'application déclenche un événement de type r_q afin de créer un message contenant des métadonnées de routage (m_{md}) comme le montre la figure 8.7 et qui sera transmis seul vers le nœud voisin. Une fois le message reçu par le nœud voisin, celui-ci répondra avec un message de métadonnées.

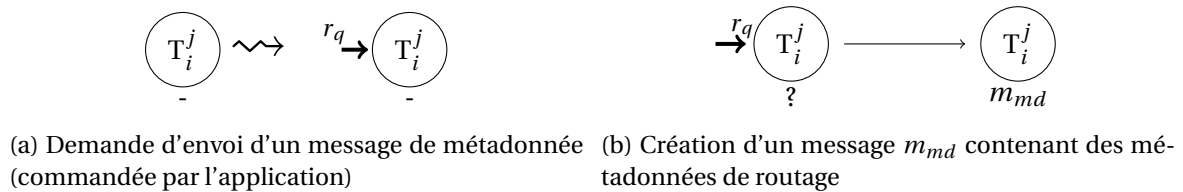


FIGURE 8.7 – Création d'un message contenant des métadonnées de routage

L'algorithme utilisé par le protocole de routage repose sur un algorithme d'apprentissage de type Q-learning afin de déterminer si un paquet doit être envoyé ou bien conservé. Dans le chapitre 6 nous avons développé des fonctions de récompense qui se basent sur le niveau d'énergie des nœuds et sur le délai d'acheminement estimé d'un paquet. Afin d'améliorer le routage des données, il est judicieux de prendre en compte la distance relative entre les groupes en comparant les identifiants multiniveaux. Nous définissons la fonction de récompense $H(n, d, m)$ associée à la

distance entre le groupe d'un nœud n possédant un message à destination du groupe d et celle du nœud rencontré m :

$$H(n, d, m) = \begin{cases} 0 & \text{si } m \text{ est plus proche de } d \text{ que } n \\ -0.5 & \text{si } m \text{ est aussi proche de } d \text{ que } n \\ -1 & \text{si } m \text{ est plus éloigné de } d \text{ que } n \end{cases} \quad (8.1)$$

Nous redéfinissons maintenant les fonctions de récompense a_{hold} et $a_{transmit}$ qui sont respectivement associées aux actions de conservation du paquet et de sa transmission. En combinant les équations 6.17 et 6.18 présentées dans le chapitre 6 et celle présentée précédemment, nous définissons les fonctions de récompense associées aux actions a_{hold} et $a_{transmit}$. Lorsque le nœud n rencontre un nœud m , la fonction de récompense r_g associée à l'action de garder le paquet est définie par :

$$r_g = H(n, d, m) + E(n) + D(n, m). \quad (8.2)$$

La fonction de récompense r_t associée à l'action de transmettre les données est calculée par :

$$r_t = H(n, d, m) + \alpha E(m) + \beta D(n, m). \quad (8.3)$$

L'objectif de ces fonctions est d'évaluer la capacité d'un nœud à transmettre un paquet à une destination en prenant en compte son niveau hiérarchique, sa capacité à rencontrer le groupe cible et son niveau d'énergie. Concernant les autres mécanismes associés aux protocoles de routage tels que la réplication des messages, ils restent inchangés.

Adaptation de l'algorithme de routage hybride (Direct/Tolérant aux délais)

Lorsqu'un nœud est hybride, il possède la capacité de transmettre directement les données ou bien de conserver les paquets reçus ou générés par une application et de les transmettre ultérieurement. Nous avons décrit précédemment les modifications apportées à la stratégie tolérante aux délais afin d'offrir un service d'acheminement des données entre des entités faisant partie de groupes différents. Nous poursuivons les modifications apportées au protocole hybride en nous intéressant à l'algorithme d'acheminement direct.

Comme pour le protocole tolérant aux délais, ce protocole se base sur l'envoi périodique de messages de sonde qui permettent d'évaluer la qualité des liens locaux et de découvrir les chemins entre les nœuds. Lorsqu'un message (m_r) est consommé par l'application de routage d'un nœud, celle-ci regarde si le message doit être retransmis ou bien supprimé (voir chapitre 7). Si un message doit être retransmis l'application déclenche un événement associé (r_r) et diffuse le message retransmis (m_{rr}) comme le montre la figure 8.8.



(a) Demande de retransmission d'un message réceptionné (commandée par l'application)

(b) Retransmission d'un message périodique m_{rr} contenant les informations de routage

FIGURE 8.8 – Retransmission d'un message de routage par un nœud hybride

À chaque réception d'un message la table de routage est mise à jour (figure 8.5). Cette mise à jour se traduit soit par le calcul de la qualité des liens locaux soit par la détermination des chemins vers les nœuds dit connectés. Le calcul de la qualité des liens locaux est déclenché lorsque l'identifiant du créateur du message périodique est identique à l'identifiant du dernier émetteur ou lorsque l'identifiant du nœud récepteur est identique à l'identifiant du nœud créateur du message. Le processus de sélection d'un meilleur chemin doit quant à lui prendre en compte la notion de groupe. Un nœud doit donc déterminer un meilleur voisin pour atteindre un groupe. Pour cela le nœud ne prend plus en compte l'identifiant du nœud créateur du message mais le groupe auquel il appartient, comme le montre la figure 8.9. Dans cette configuration le nœud possédant

l'identifiant 30 et faisant partie du groupe 98 sélectionne le nœud 32 comme meilleur voisin pour atteindre le groupe 33.

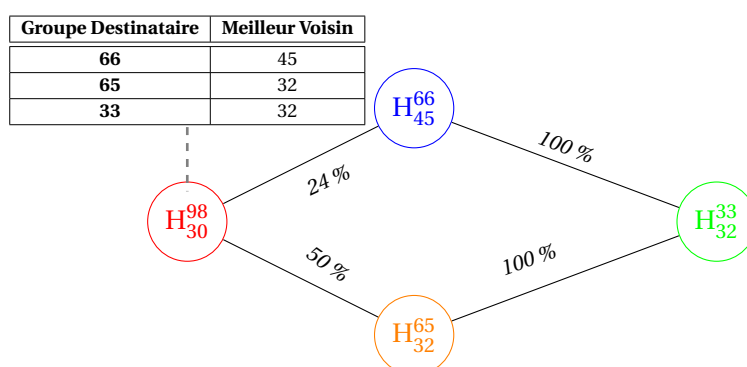


FIGURE 8.9 – Évaluation du meilleur chemin vers un groupe

8.2.4 Détails techniques

Dans cette section nous décrivons quelques détails supplémentaires concernant les modifications apportées au protocole. Nous intéressons en particulier aux messages de routage et aux mécanismes de passerelle entre les réseaux terrestres et sous-marins.

Modification des messages de routage

L'ajout d'une information concernant les groupes modifie le format et la taille des messages échangés. Chaque message de routage se voit donc ajouter un champ de huit bits qui correspond aux identifiants de groupe. La taille des messages de routage utilisés par les protocoles sous-marins et terrestres sont augmentés de huit bits, comme le montre le tableau 8.2.

TABLEAU 8.2 – Taille des messages de routage

Routage	Message	Taille (bit)
Hybride	Annonce	168
Hybride	Métadonnée	121
DTN	Annonce	40
DTN	Métadonnée	81

Passerelle entre les réseaux terrestres et sous-marins

Les réseaux DTN et hybrides respectivement associés aux réseaux sous-marins et aux réseaux terrestres ne peuvent pas directement communiquer dans la mesure où ils utilisent des interfaces de communication différentes. Il est donc indispensable de mettre en place des passerelles entre ces réseaux, rôle que peuvent endosser les engins marins de surface. Ces engins évoluant à la surface de l'eau peuvent (à condition de posséder les interfaces physiques nécessaires) communiquer avec les engins sous-marins et terrestres. Nous introduisons la notion d'interface virtuelle qui a pour objectif de gérer ces deux types d'interfaces. Cette interface virtuelle permet d'agréger les deux interfaces physiques, de manière à rendre transparente la transmission de données entre les types de véhicules (terrestres et sous-marins). L'identifiant de groupe diffusé par les deux interfaces est identique puisque celui-ci est construit à partir d'un identifiant multiniveau et d'un identifiant de sous-groupe attribué de manière unique à chaque groupe. L'algorithme de routage

maintenu est de type hybride combinant une approche MANET/DTN. Toutefois, lorsque le protocole demande à émettre un message périodique ou bien à attacher des métadonnées à un message, le format de ces messages est déterminé en fonction de l'interface physique qui le transmettra. Cette approche permet également de ne maintenir qu'un seul système de gestion de file d'attente qui conserve les paquets en attente de transmission.

8.3 Interopérabilité avec le protocole IP

Les protocoles de routage développés dans cette thèse opèrent au niveau MAC, ce qui garantit leur indépendance vis-à-vis des protocoles des couches supérieures. Bien que les mécanismes de gestion de groupes puissent être implémentés au niveau de la couche MAC, la segmentation et l'adressage des groupes sont des tâches nativement gérées par le protocole IP. L'objectif est de pouvoir adresser les engins de façon à prendre en compte le groupe auquel ils appartiennent. Il existe à l'heure actuelle deux solutions : l'une est basée sur la version quatre du protocole IP (IPv4), l'autre sur la dernière version (IPv6). Afin d'être compatible avec ces deux technologies, nous proposons donc deux solutions, l'une pour IPv4, la seconde pour IPv6.

8.3.1 Le protocole IPv4

La version 4 du protocole IP est actuellement la plus répandue, que ce soit sur les réseaux à large ou à petite échelle. Dans cette section, nous étudions les problématiques liées à la diffusion des données et aux mécanismes de résolution d'adresses effectués par le protocole ARP.

Adressage et diffusion

Les adresses IPv4 sont codées sur 32 bits (4 octets) et on distingue trois classes historiques². Ces classes présentées dans le tableau 8.3 permettent d'effectuer un adressage en fonction de la taille du réseau.

TABLEAU 8.3 – Classes d'adresses avec IPv4

Classe	Adresses	Masque
A	0.0.0.1 - 126.255.255.255	/8
B	128.0.0.1 - 191.255.255.255	/16
C	192.0.0.1 - 223.255.255.255	/24

Les adresses IPv4 sont composées de deux parties, la première identifie le réseau, la seconde adresse les hôtes d'un réseau. Afin de pouvoir distinguer ces deux parties on utilise un masque réseau qui définit le nombre de bits alloué à l'identification de la partie réseau et à l'identification de la partie hôte. Parmi les adresses IPv4, on distingue celles qui sont publiques et qui permettent à un hôte de pouvoir être routé sur Internet et celles qui sont privées et qui n'ont qu'une portée dans un réseau local. Le tableau 8.4 résume les plages d'adresses publiques et privées.

TABLEAU 8.4 – Plages d'adresses privées avec IPv4

Préfixes	Masques	Masque
10.0.0.0	/8	10.0.0.0 - 10.255.255.255
172.16.0.0	/12	172.16.0.0 - 172.31.255.255
192.168.0.0	/16	192.168.0.0 - 192.168.255.255

2. En réalité il y en a cinq, la quatrième est dédiée au multicast, la cinquième est utilisée à des fins expérimentales.

Les adresses IPv4 permettent de diffuser une information de manière unicast, broadcast ou encore multicast. Toutefois, l'acheminement d'informations en anycast n'est pas supporté nativement par le protocole.

Une première solution serait de segmenter le réseau de manière classique, de sorte que chaque groupe possède un identifiant réseau distinct comme le montre la figure 8.10a. L'avantage de ce type de déploiement est que chaque groupe est clairement identifié par un préfixe réseau distinct. Il nécessite toutefois de mettre en place des passerelles afin que chaque groupe puisse communiquer. Cependant chaque véhicule devrait posséder plusieurs adresses IP chacune associée à un groupe afin de pouvoir communiquer avec chaque membre des groupes présents dans le réseau. Par conséquent, la segmentation des groupes ne peut pas être assurée avec cette méthode.

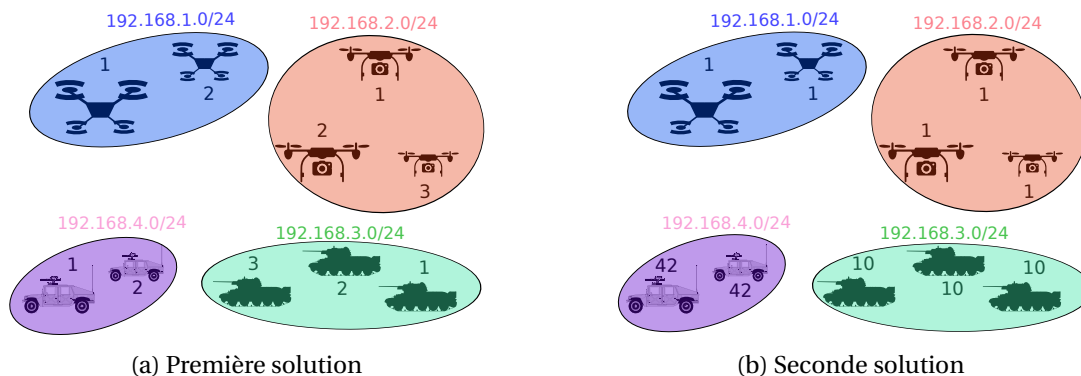


FIGURE 8.10 – Segmentation du réseau : l'approche avec IPv4

Une seconde approche consisterait à segmenter le réseau avec un préfixe de réseau distinct où chaque membre possède le même identifiant, (figure 8.10b). Si un véhicule souhaite transmettre des données à un membre du groupe, seul le préfixe du réseau et l'identifiant unique partagé par tous les véhicules sont nécessaires. Cette segmentation permet donc à un véhicule de transmettre une information à un membre d'un groupe. Toutefois, cette segmentation pose le même problème concernant l'adressage multiple des interfaces.

On constate donc que la segmentation du réseau au niveau IP seul ne permet pas de fournir une solution acceptable au vu de celles présentées précédemment. Une meilleure approche serait de segmenter le réseau non plus au niveau IP mais au niveau MAC, comme le montre la figure 8.11. Cela se traduirait donc par une gestion de groupe par le protocole de routage. Les véhicules seraient alors adressés au sein d'un même domaine IP, par exemple l'utilisation du bloc d'adresse (10.0.0.0/8) nous permet d'adresser jusqu'à 16777216 véhicules.

La diffusion des données en anycast serait alors assurée par le protocole de routage. Pour cela le protocole applicatif doit pouvoir communiquer à la couche MAC le groupe destinataire cible. Chaque paquet généré par l'application se voit alors adressé au niveau IP à l'ensemble des entités du réseau via une adresse de broadcast, puis l'application communiquerait à la couche MAC l'adresse du groupe cible. Le champ *adresse destination* de la trame MAC contiendrait alors l'adresse du nœud voisin en fonction du groupe destinataire. Chaque trame envoyée devrait donc embarquer des informations de routage concernant le groupe destinataire cible.

Mécanisme de résolution d'adresses

Le mécanisme de résolution d'adresses est assuré par le protocole ARP. Il a pour charge d'assurer la correspondance entre les adresses MAC et IP. Lorsqu'un nœud souhaite transmettre un paquet vers une destination dont il connaît l'adresse, il émet une requête ARP afin de déterminer l'adresse MAC de la cible. Seul le destinataire est en charge d'envoyer une réponse qui une fois reçue par le nœud met à jour son cache ARP et envoie le paquet en attente. Notre protocole de routage opérant au niveau MAC introduit une problématique spécifique à ces protocoles. En ef-

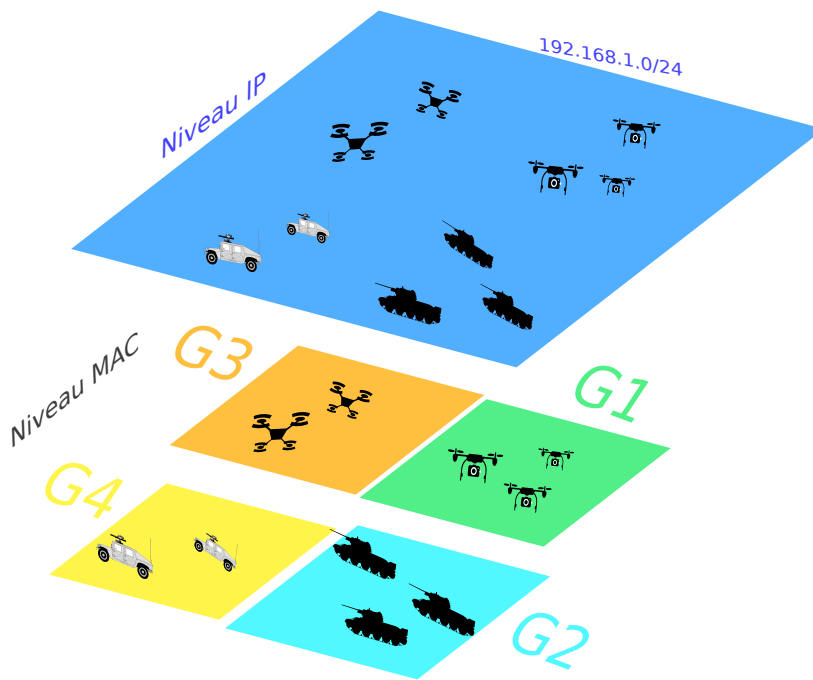


FIGURE 8.11 – Segmentation du réseau : l'approche conjointe IPv4/MAC

fet, lorsqu'un paquet est destiné à un nœud situé à plus d'un saut, la requête ARP ne peut aboutir puisqu'elle n'a qu'une portée locale et ne peut donc atteindre le nœud destinataire.

Pour résoudre ce problème deux approches peuvent être envisagées. La première solution consiste à pré-remplir le cache ARP de tous les nœuds de sorte à ce qu'ils contiennent toutes les adresses attribuées aux nœuds. Cette solution peut être envisagée dans l'utilisation de simulateurs réseaux qui permettent d'accéder aux caches ARP. Une seconde solution consiste à modifier les messages de sonde en ajoutant l'adresse IP du nœud qui émet ce message. De cette manière chaque nœud recevant un message de sonde met à jour à la fois sa table de routage et son cache ARP. Cette solution est aisément supportable si il n'y a que des adresses IPv4 utilisées. Dans le cas contraire, ce champ doit avoir une taille dynamique afin d'être compatibles avec différents protocoles.

8.3.2 Le protocole IPv6

Le protocole IPv6 se présente comme le successeur de la version 4. Il introduit en particulier un nouveau format d'adressage codé sur 128 bits et supporte la diffusion d'informations en unicast, multicast et anycast. Dans cette section, nous focalisons notre attention sur les adresses IPv6 et sur leur utilisation pour permettre à des données d'être diffusées en anycast. Nous aborderons ensuite la problématique liée à la résolution d'adresses.

Adressage et diffusion

Avec IPv6 une adresse est codée sur 128 bits au lieu de 32 bits comme en IPv4. La représentation textuelle d'une telle adresse se fait en découpant l'adresse en huit mots de seize bits. Par exemple : 2001:0DB8:4751:0000:0000:A987:6543:210F. Il est possible de l'écrire de manière plus compacte en enlevant les zéros placés en tête, et en remplaçant les champs nuls consécutifs par " : ". On obtient alors l'adresse 2001:DB8:4751::A987:6543:210F.

Il existe trois types d'adresse IPv6 qui permettent de diffuser une information en unicast, multicast et anycast. Les adresses unicast permettent d'identifier une interface réseau de manière unique. Parmi ces adresses, on distingue celles qui auront une portée locale et celles qui ont une portée globale autrement dit peut être routées sur Internet. Les adresses multicast permettent

de créer des groupes de nœuds. Lorsqu'un paquet est envoyé à une destination possédant une adresse multicast, il est acheminé à toutes les interfaces membres du groupe. Les adresses anycast ont une fonction similaire aux adresses multicast, à la différence qu'un paquet est acheminé non pas vers toutes les interfaces du groupe mais à une seule. Les adresses broadcast, n'existent plus et sont remplacées par des adresses multicast qui permettent d'émuler ce mode. Le tableau 4 montre les préfixes d'adresses associés aux types d'adresses. Il est important de spécifier que IPv6 permet nativement d'assigner plusieurs adresses à une interface, par exemple une adresse de lien-local et une adresse globale.

TABLEAU 8.5 – Types d'adresse IPv6

Préfixe	Type	Description
0000 ::/8	Autres adresse	Adresse transitoire ou de bouclage
2000 ::/3	Adresse globale	Routable sur Internet
FC00 ::/7	Adresse local unicast	Restreinte à un site (déprécié)
FE80 ::/10	Adresse de lien-local	Validité restreinte à un lien
FF00 ::/8	Adresses Multicast	Acheminement à tous les membres du groupe

La majorité des adresses IPv6 sont construites à partir d'un identifiant de l'interface codé sur 64 bits. Plusieurs méthodes d'attribution peuvent être employées : manuelle, basée sur l'adresse de niveau liaison de données; aléatoire et via une méthode cryptographique. Nous nous focalisons sur la seconde solution (basée sur l'adresse de liaison de données) puisqu'elle nous permettent de faire le lien entre l'adresse physique et l'adresse réseau sans le besoin d'utiliser le protocole de découverte des voisins.

Lorsque l'identifiant de l'interface est créé à partir de l'adresse MAC (48 bits)³, celle-ci est convertie au format EUI-64⁴ puis le bit *u* est fixé à 1. Le processus de transformation est rappelé en figure 8.12.

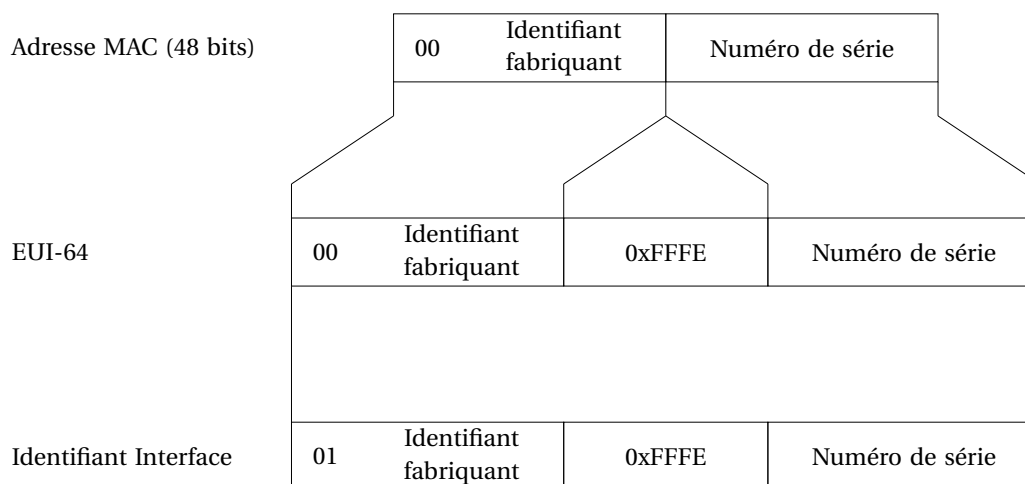


FIGURE 8.12 – Transformation d'une adresse MAC en identifiant d'interface

La construction des adresses de lien local requière la juxtaposition du préfixe FE80 ::/64 et l'identifiant de l'interface, figure 8.13.

3. Dans le cas des adresses MAC des interfaces sous-marines (8 bits), une solution serait de les coder sur 48 bits pour la construction de l'identifiant d'interface.

4. Format utilisé pour les réseaux IEEE 1394 (Firewire) et 802.15.4.

<i>10</i>	<i>54</i>	<i>64</i>
FE80	0...0	identifiant interface

FIGURE 8.13 – Format d’une adresse de lien local

Les adresses unicast routables (2000 ::/3) sur Internet sont composées : (i) d’un préfixe global codé sur 48 bits alloué par le fournisseur d’accès, (ii) un identifiant de topologie locale codé sur 16 bits et (iii) de l’identifiant de l’interface, figure 8.14.

<i>3</i>	<i>45</i>	<i>16</i>	<i>64</i>
001	Préfixe global	Identifiant sous-réseau	Identifiant interface

FIGURE 8.14 – Format d’une adresse globale

Le format d’une adresse anycast est donnée par la figure 8.15. Elle est composée d’une partie préfixe et d’une partie identifiant anycast. La partie préfixe est la même que celle utilisée pour les adresses globales à la différence que la longueur du préfixe peut être adaptée selon le plan d’adressage. Deux modes de fonctionnement sont possibles. Le premier consiste à attribuer une même adresse anycast à plusieurs nœuds. Le second consiste à utiliser un préfixe virtuel. Nous faisons le choix d’utiliser le premier mode de fonctionnement qui nous permet de segmenter le réseau plus simplement et donc de déployer plus facilement des adresses anycast sur les véhicules autonomes. L’utilisation d’un préfixe virtuel nous aurait obligé à attribuer différents sous-réseaux dont un dédié aux adresses anycast, ce qui implique de définir un plan d’adressage.

<i>n bits</i>	<i>128-n</i>
Préfixe du réseau	identifiant anycast

FIGURE 8.15 – Format d’une adresse anycast

Notre approche consiste à attribuer à la fois des adresses unicast globales et des adresses anycast à chacun des nœuds. Les adresses globales unicast sont formées à partir d’un identifiant global local identique pour tous les nœuds afin d’intégrer l’ensemble des véhicules au sein d’un même réseau. Chaque identifiant réseau est construit à partir de l’adresse MAC (fig 8.12) afin d’éviter les conflits entre les adresses unicast. Les adresses anycast sont construites à partir du même préfixe que les adresses unicast globales, tandis que l’identifiant anycast est attribué en fonction du groupe auquel appartient un nœud. Ce plan d’adressage permet d’éviter les conflits entre les adresses unicast et anycast puisque la partie identifiant des adresses unicast est construite à partir de l’adresse MAC, tandis que l’identifiant anycast est construit via un simple nombre entier. Par ailleurs, ce plan d’adressage permet à un nœud de transmettre une information soit à un nœud unique, soit un nœud parmi un groupe destinataire. Un exemple d’un plan d’adressage basé sur IPv6 utilisant conjointement les adresses unicast globales et anycast est donné figure 8.16.

Mécanisme de résolution d’adresses

Le protocole IPv6 est doté d’un protocole dédié à la découverte du voisinage appelé Neighbour Discovery Protocol. Il utilise des messages ICMPv6 afin de détecter les voisins locaux, de configurer automatiquement les équipements et d’effectuer une résolution d’adresse. Une des fonctionnalités de ce protocole est de résoudre les adresses comme le fait le protocole ARP avec IPv4. Nous avons vu précédemment qu’un tel protocole ne fournissait pas le service adéquat lorsque l’on utilise un protocole de routage au niveau MAC. Par conséquent deux solutions peuvent être envisagées. La première consiste à remplir la table de correspondance entre les adresses IPv6 et

4. Identifiant également utilisé par le protocole Rogue pour router les informations entre les groupes.

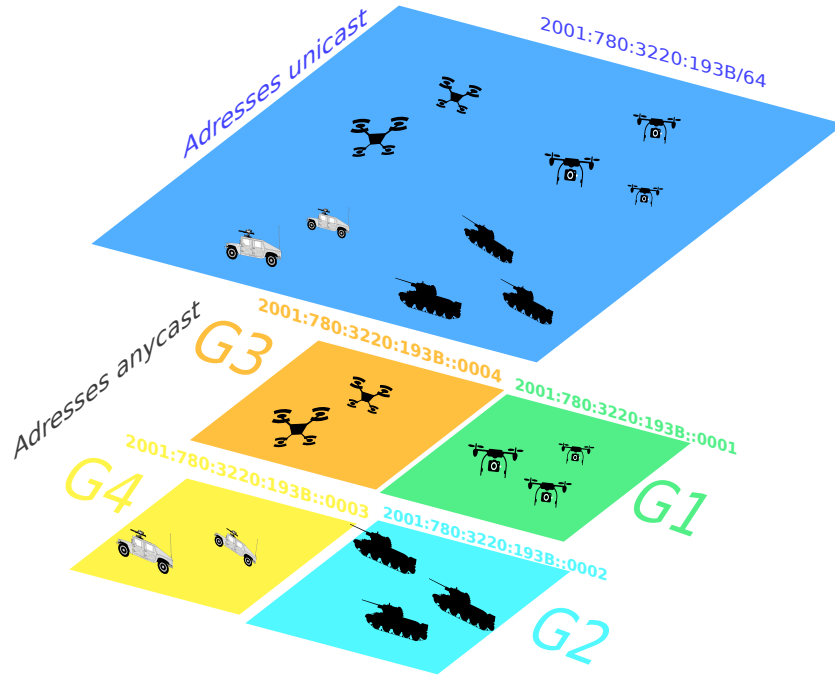


FIGURE 8.16 – Plan d’adressage unicast/anycast avec IPv6

les adresses MAC avant le déroulement du scénario, ce qui est faisable dans un environnement simulé mais difficile et fastidieux en pratique. Une seconde solution consiste à utiliser le principe de construction d’une adresse IPv6 à partir de l’adresse MAC. De cette manière la table de correspondance des adresses est remplie au fur et à mesure de la réception de paquets en provenance de différents nœuds. Cette solution est aisément exploitable en pratique puisque ce mode de construction est standardisé par le protocole IPv6.

8.4 Simulation et évaluation

Dans cette section nous étudions les performances du protocole de routage avec la notion de groupes. Nous nous intéressons en particulier au taux de paquets délivrés ainsi qu’au délai d’acheminement de bout en bout. Nous avons défini une zone de $2000m \times 2000m$ où quatre groupes de véhicules évoluent, chacun représentant un type aérien, terrestre, marin de surface et sous-marin. Les engins aériens évoluent sur la moitié de la zone ($1000m \times 1000m$) à une altitude de $100m$. Les engins terrestres évoluent eux aussi sur cette zone mais avec une altitude nulle. La seconde moitié de la zone est occupée par les engins marins, ceux de surface évoluent au niveau de la mer, tandis que les engins sous-marins évoluent à une profondeur allant de 0 à $-100m$.

Dans notre étude nous considérons que les engins évoluent en espace libre et nous fixons les paramètres de propagation pour les médias terrestres et aériens en conséquence. Concernant les réseaux terrestres nous reprenons les paramètres de propagation utilisés pour la simulation en espace libre (premier scénario) et qui sont détaillés dans le tableau 7.1. Concernant les réseaux sous-marins nous utilisons les paramètres de propagation décrits dans le tableau 6.3. Nous considérons également les modèles de mobilité suivants. Pour décrire la mobilité des engins aériens nous utilisons le modèle de mobilité paparazzi avec des engins possédant une vitesse de $15m.s^{-1}$. La mobilité des engins terrestres et maritimes de surface est décrite via un modèle de type Random Waypoint. La vitesse pour les véhicules terrestres est fixée à $15m.s^{-1}$ tandis que pour les véhicules marins cette vitesse est fixée à $4m.s^{-1}$. Enfin la mobilité des engins sous-marins est décrite à partir d’un modèle de mobilité réaliste décrivant les mouvements du véhicule REMUS avec une vitesse minimale de $0.25m.s^{-1}$ et maximale de $2.8m.s^{-1}$.

Afin de déterminer le taux de paquets délivrés et le délai d’acheminement de bout en bout,

nous faisons communiquer quatre nœuds. Chacun fait partie d'un groupe distinct et transmet des paquets à destination de chaque groupe. Des données de dix octets sont générées chaque seconde par une application UDP pendant quarante cinq minutes.

Taux de paquet délivré

La figure 8.17 montre le taux moyen de paquets délivrés en fonction du nombre de nœuds. De manière globale l'approche anycast (routage de groupe) est plus performante que l'approche unicast (entre deux véhicules). Cette différence s'explique par la technique de routage utilisée par l'algorithme DTN qui prend en compte le niveau hiérarchique des groupes pour transmettre ou conserver les paquets. Dans ce contexte une diffusion unicast ne permet pas de transmettre les paquets de manière efficace.

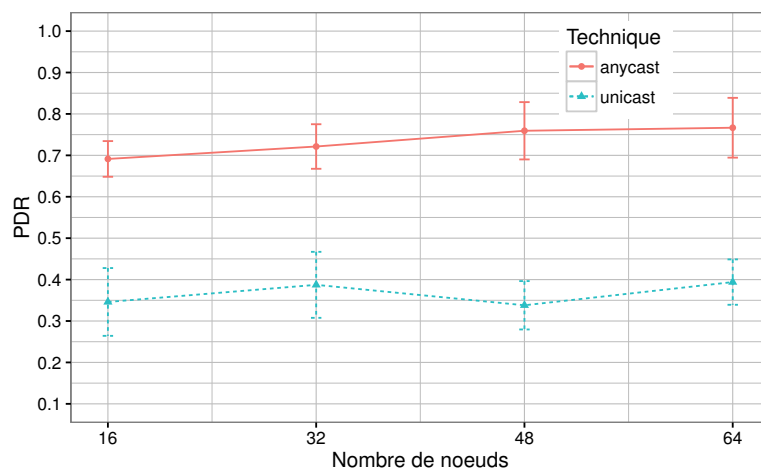


FIGURE 8.17 – Taux moyen de paquets délivrés en fonction du nombre de nœuds

Délai d'acheminement

La figure 8.18 montre le délai moyen d'acheminement des paquets en fonction du nombre de nœuds. L'approche de routage par groupe permet de réduire de manière significative le délai d'acheminement comparé à l'approche par unicast. On remarque que le nombre de nœuds influence de manière positive le délai d'acheminement puisque celui-ci est réduit au fur et à mesure que le nombre augmente.

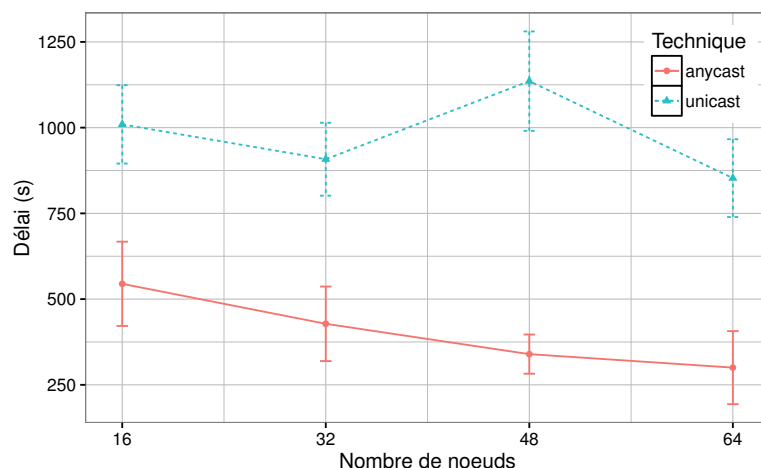


FIGURE 8.18 – Délai moyen d'acheminement en fonction du nombre de nœuds

8.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les modifications apportées à notre protocole afin qu'il supporte la notion de groupe que nous avons définie. Nous avons développé une interface virtuelle qui permet d'agréger les interfaces radios et acoustiques. Elle permet aux engins marins de surface de jouer le rôle de passerelles entre les engins sous-marins et terrestres et masque du point de vue applicatif la nature des interfaces physiques maintenues par l'engin. Enfin, nous avons montré comment le protocole de routage pouvait interagir avec la couche IP et notamment avec les différentes versions existantes (IPv4 et IPv6) de façon à être compatible avec la pile protocolaire IP. Les expérimentations que nous avons menées nous ont permis de montrer que notre approche permet d'augmenter les performances de notre protocole.

Conclusion générale et perspectives

Synthèse des travaux

Dans ce document, nous avons étudié les communications des systèmes autonomes afin de proposer un protocole de routage qui permet à des systèmes hétérogènes (par ex. aérien, terrestre et marin) de communiquer. Ce protocole fournit un service d'acheminement des données de bout en bout, tout en combinant deux algorithmes de routage, le premier tolérant aux délais, le second permet l'acheminement direct des données. Le protocole proposé fournit également un service d'acheminement des données soit en unicast, soit en anycast.

Afin de comprendre les systèmes et les problématiques associées, nous nous sommes intéressés dans le premier chapitre à la taxonomie des systèmes autonomes et aux projets et résultats de recherches actuelles dans les configurations où les véhicules opèrent seuls, en groupes et avec d'autres véhicules hétérogènes. Nous avons mis en évidence qu'il existe des systèmes aériens, terrestres, marins et sous-marins qui possèdent différents niveaux d'autonomie définis en fonction de leur degré d'interaction avec l'opérateur. Nous avons également montré la complexité de la mise en collaboration d'engins hétérogènes, dans le sens où ils évoluent dans des milieux différents impactant à la fois la mobilité des engins et les propriétés de communication. Dans le second chapitre, nous avons présenté les problématiques sous-jacentes à la coopération des systèmes autonomes incluant la mobilité des engins, les médias de transmission et les architectures réseau. Nous avons montré que les réseaux sous-marins et les réseaux terrestres étaient fondamentalement différents du fait de l'utilisation d'un média de transmission différent. Dans le chapitre trois nous avons approfondi l'étude des médias de transmission en détaillant les phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques dans l'air et les ondes acoustiques dans l'eau de mer. Nous avons également observé que l'utilisation de médias de transmission différents nécessitait le déploiement de techniques d'accès aux médias distinctes. Dans le chapitre quatre, nous avons étudié les protocoles de routage MANET et DTN utilisés dans les réseaux terrestres et sous-marins. Nous avons montré que les approches classiques étaient insuffisantes dans les réseaux de véhicules autonomes, dans la mesure où la mobilité des nœuds entraîne des coupures de liens fréquentes et imprévisibles et modifie rapidement la topologie du réseau.

Afin de permettre l'acheminement d'informations entre différents systèmes autonomes, nous avons proposé dans cette thèse quatre contributions. La première, présentée dans le chapitre cinq est la métrique F-ETX qui permet d'évaluer la qualité et de déterminer l'état des liens locaux. L'objectif de F-ETX est de fournir malgré la dynamique des nœuds une évaluation complète et précise d'un lien dans les réseaux terrestres en se basant sur sa qualité et son état. Cette métrique s'appuie sur une gestion dynamique de la taille des fenêtres qui permettent d'observer les paquets reçus/perdus. En se basant sur les occurrences de pertes des paquets, la taille des fenêtres est alors réduite ou augmentée. La métrique fournit une estimation de la qualité du lien en se basant sur une estimation à court et à long terme afin de discriminer les liens ayant une qualité de tendance décroissante. L'indicateur de stabilité permet d'anticiper la coupure d'un lien et indique si ce lien est viable pour le transport de données. Enfin, l'indicateur de lien unidirectionnel permet de déterminer si l'état unidirectionnel d'un lien est transitoire ou durable. La seconde contribution présentée dans le chapitre six est un protocole de routage DTN pour les réseaux sous-marins mobiles. L'objectif du protocole est de maximiser le taux de paquets transmis avec succès tout en

minimisant le délai d'acheminement et la consommation énergétique. Contrairement aux protocoles couramment utilisés dans ce milieu, il n'utilise aucune information sur la localisation des nœuds. L'algorithme de routage s'appuie sur une machine à apprentissage par renforcement, Q-Learning, qui prend en compte la consommation énergétique des nœuds et les occurrences de rencontres pour déterminer si un paquet doit être transmis ou conservé. Le protocole intègre un mécanisme de gestion de file d'attente qui prend en compte la date d'échéance du paquet pour déterminer les paquets à transmettre en priorité. Il intègre également un mécanisme de duplication de paquets basé sur l'utilisation de la date d'échéance du paquet pour le transmettre dans les délais impartis. La troisième contribution présentée dans le chapitre sept est un protocole MANET/DTN conçu pour les réseaux terrestres. L'objectif de ce protocole est d'exploiter la densité de la topologie du réseau afin de maximiser le taux de paquets transmis avec succès et de réduire le délai d'acheminement. Ce protocole supporte deux algorithmes de routage, l'un dédié à la transmission directe des données (MANET), l'autre permet de conserver les données en attendant leur transmission (DTN). Ce protocole intègre également la métrique F-ETX dans le but d'évaluer la qualité et l'état des liens locaux. L'algorithme de routage MANET utilise une technique de routage proactive, où chaque nœud s'annonce sur le réseau. Il exploite les informations données par la métrique F-ETX pour sélectionner les meilleurs liens locaux et déterminer si un lien est viable. S'il n'est pas viable, le protocole de routage converse les paquets à transmettre et utilise l'algorithme de routage DTN. Cet algorithme s'inspire de celui développé dans le chapitre précédent et utilise lui aussi un algorithme d'apprentissage par renforcement. La quatrième contribution, présentée dans le chapitre huit est l'exploitation de la diffusion des données en anycast. En considérant que les véhicules opèrent à différentes altitudes et que chaque type de véhicule fournit un ou des services distincts, on peut segmenter le réseau en plusieurs groupes. Un paquet est alors diffusé non plus à un véhicule précis, mais à un véhicule faisant partie du groupe destinataire. L'objectif de cette approche est de diminuer le délai d'acheminement des paquets et de permettre de déployer un grand nombre de véhicules sans augmenter la complexité du routage.

Perspectives

Les travaux initiés dans cette thèse nous permettent d'envisager les perspectives suivantes. La première concerne les travaux de thèse qui ont été menés en parallèle au LaBRI par V. Autefage [Aut15] et qui consistent à fournir des services dans un réseau mobile de véhicules autonomes. Ces travaux se placent au niveau applicatif tandis que ceux que nous avons menés se placent au niveau des transmissions et donc à un niveau inférieur. Il serait pertinent d'étudier si les deux approches peuvent être utilisées conjointement et si tel est le cas de déterminer si les deux protocoles sont compatibles et de mesurer les performances obtenues. Une seconde concerne l'interaction avec l'architecture standard JAUS [RW08] qui fournit elle aussi un service de communication de haut niveau entre véhicules. La troisième concerne l'implémentation des solutions développées et la mesure de leurs performances dans un milieu réel. En effet, tout au long de nos travaux, nous nous sommes attachés à simuler des environnements les plus réalistes possibles à la fois en termes de mobilité et de propagation du signal, toutefois, nos contributions n'ont pas été testées dans un environnement réel. Bien que nos modèles aient été développés dans le simulateur ns-3, celui-ci offre la possibilité d'associer les interfaces simulées et des interfaces réelles afin de transmettre physiquement les données. De cette manière, seule la pile protocolaire est simulée. Cependant, ces tests ne pourront être déployés que sur une petite échelle dans la mesure où chaque nœud du réseau simulé doit être associé à un véhicule réel. La quatrième piste concerne le support de l'anycast avec IPv6. Il n'existe pas de standard précis pour construire une adresse de type Anycast ni une spécification sur son utilisation par les applications. Cette limite tend à restreindre le déploiement de ces services qui exploitent au mieux la configuration des systèmes autonomes. Des travaux de recherche devront être poursuivis dans le but de définir une spécification liée à l'anycast et à l'exploitation de ce type d'acheminement.

Enfin, cette thèse a contribué aux travaux actuels de l'équipe en mettant en évidence qu'une

coopération entre des engins hétérogènes est possible. Durant nos travaux nous nous sommes focalisés sur les couches de bas-niveau tandis que les travaux menés conjointement par V. Autefage ont permis [Aut15] de fournir un protocole de découverte et de diffusion de services de haut niveau. À la suite de ces deux travaux, une thèse devrait rapidement débiter sur les questions de sécurité dans ces réseaux puisque aucune solution n'a été actuellement proposée.

Bibliographie

- [80213] Ieee standard for information technology– telecommunications and information exchange between systemslocal and metropolitan area networks–specific requirements–part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications–amendment 4 : Enhancements for very high throughput for operation in bands below 6 ghz. *IEEE Std 802.11ac-2013 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012, IEEE Std 802.11aa-2012, and IEEE Std 802.11ad-2012)*, pages 1–425, Dec 2013. 29
- [ABAF11] Muhammad Ayaz, Imran Baig, Azween Abdullah, and Ibrahima Faye. A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 34(6) :1908 – 1927, 2011. Control and Optimization over Wireless Networks. 74, 108
- [Abr70] Norman Abramson. The aloha system : Another alternative for computer communications. In *Proceedings of the November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference*, AFIPS '70 (Fall), pages 281–285, New York, NY, USA, 1970. ACM. 48
- [ACE14] ACERP. Observatoire sur la couverture et la qualité des services mobiles. www.arcep.fr/index.php?id=12433, Jul 2014. 28
- [ACLY00] R. Ahlswede, Ning Cai, S. Y. R. Li, and R. W. Yeung. Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(4) :1204–1216, Jul 2000. 71
- [AEGPS10] Nils Aschenbruck, Raphael Ernst, Elmar Gerhards-Padilla, and Matthias Schwamborn. Bonnmotion : A mobility scenario generation and analysis tool. In *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, SIMUTools '10, pages 51 :1–51 :10, 2010. 86
- [AEM10] N. Aschenbruck, R. Ernst, and P. Martini. Indoor mobility modelling. In *GLOBE-COM Workshops (GC Wkshps)*, 2010 IEEE, pages 1264–1269, Dec 2010. 24
- [AGPM09] Nils Aschenbruck, Elmar Gerhards-Padilla, and Peter Martini. Modeling mobility in disaster area scenarios. *Performance Evaluation*, 66(12) :773 – 790, 2009. Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks. 97
- [AICR07] G.G. Acosta, O.A.C. Ibanez, H.J. Curti, and A.F. Rozenfeld. Low-cost autonomous underwater vehicle for pipeline and cable inspections. In *Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, 2007. Symposium on, pages 331–336, April 2007. 17
- [AKSH09] P. Alleman, A. Kleiner, C. Steed, and D. Hook. Development of a new unmanned semi-submersible (uss) vehicle. In *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future : Global and Local Challenges*, pages 1–6, Oct 2009. 15
- [Ald08] O.O. Aldawibi. A review of current routing protocols for ad hoc underwater acoustic networks. In *Applications of Digital Information and Web Technologies, 2008. ICADIWT 2008. First International Conference on the*, pages 431–434, Aug 2008. 73
- [Ali12] K.A. Ali. *Modélisation et étude de performances dans les réseaux VANET*. Theses, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Oct 2012. 36

- [APM04] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, and Tommaso Melodia. Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks. *SIGBED Rev.*, 1(2) :3–8, July 2004. 27
- [ASSC02] I.F. Akyildiz, Weilian Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, 40(8) :102–114, Aug 2002. 36
- [Aut15] Vincent Autefage. *Découverte de services et collaboration au sein d'une flotte hétérogène et hautement dynamique d'objets mobiles communicants autonomes*. Theses, Université de Bordeaux, October 2015. 160, 161
- [BAD⁺04] T.X. Brown, B. Argrow, C. Dixon, S. Doshi, and P. Nies. Ad hoc uav-ground network (augnet) test bed. In *4th Scandinavian Workshop on Wireless Ad-hoc Networks*, Stockholm, May 2004. 33
- [BAGL14] O. Bouachir, A. Abrassart, F. Garcia, and N. Larrieu. A mobility model for uav ad hoc network. In *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on*, pages 383–388, May 2014. 21, 22, 23
- [BAZ07] Vincent Borrel, Mostafa H. Ammar, and Ellen W. Zegura. Understanding the wireless and mobile network space : A routing-centered classification. In *Proceedings of the Second ACM Workshop on Challenged Networks*, CHANTS '07, pages 11–18, New York, NY, USA, 2007. ACM. 58
- [BBEK11] Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann, and Daniel Krajzewicz. Sumo - simulation of urban mobility : An overview. In *in SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pages 63–68, 2011. 24
- [BCFD07] R.H. Bremer, P.L.H. Cleophas, H.J. Fitski, and D.Kreus. Unmanned surface and underwater vehicles. TNO report TNO-DV 2006 A455, TNO Defense, Security and Safety, Jul 2007. 14, 15
- [BDSZ94] Vaduvur Bharghavan, Alan Demers, Scott Shenker, and Lixia Zhang. Macaw : A media access protocol for wireless lan's. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 24(4) :212–225, October 1994. 51
- [Bes03] Robert Bestak. *Reliability mecanismes (ARQ protocols) and their adaptation in 3G networks*. Theses, Télécom ParisTech, December 2003. 55
- [BGJL06] J. Burgess, Brian Gallagher, D. Jensen, and B.N. Levine. Maxprop : Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pages 1–11, April 2006. 114
- [BH] Fan Bai and Ahmed Helmy. Chapter 1 a survey of mobility models in wireless adhoc networks. 22, 24
- [BJS10] D. Broyles, A. Jabbar, and J. P. G. Sterbenz. Design and analysis of a 3-d gauss-markov mobility model for highly dynamic airborne networks. In *Telemetering Conj*, October 2010. 21, 22, 23
- [BKM⁺12] Nouha Baccour, Anis Koubâa, Luca Mottola, Marco Antonio Zúñiga, Habib Youssef, Carlo Alberto Boano, and Mário Alves. Radio link quality estimation in wireless sensor networks : A survey. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 8(4) :34 :1–34 :33, September 2012. 61
- [BKY⁺10] Nouha Baccour, Anis Koubâa, Habib Youssef, Maissa Ben Jamâa, Denis do Rosário, Mário Alves, and LeandroB. Becker. F-lqe : A fuzzy link quality estimator for wireless sensor networks. In JorgeSá Silva, Bhaskar Krishnamachari, and Fernando Boavida, editors, *Wireless Sensor Networks*, volume 5970 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 240–255. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 63, 102, 132, 183
- [BKYA15] Nouha Baccour, Anis Koubâa, Habib Youssef, and Mário Alves. Reliable link quality estimation in low-power wireless networks and its impact on tree-routing. *Ad Hoc Networks*, 27 :1 – 25, 2015. 132

- [BL03] L.M. Brekhovskikh and Yu.P. Lysanov. *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Springer, 2003. 43
- [BLV07] Aruna Balasubramanian, Brian Levine, and Arun Venkataramani. Dtn routing as a resource allocation problem. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 37(4) :373–384, August 2007. 114
- [BNO12] J. Benin, M. Nowatkowski, and H. Owen. Vehicular network simulation propagation loss model parameter standardization in ns-3 and beyond. In *Southeastcon, 2012 Proceedings of IEEE*, pages 1–5, March 2012. 97
- [Bou14] O. Bouachar. *Conception et mise en œuvre d’une architecture de communication pour mini-drones civils*. Theses, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), Dec 2014. 21, 22, 23, 29, 36
- [BPC⁺07] Paolo Baronti, Prashant Pillai, Vince W.C. Chook, Stefano Chessa, Alberto Gotta, and Y. Fun Hu. Wireless sensor networks : A survey on the state of the art and the 802.15.4 and zigbee standards. *Computer Communications*, 30(7) :1655 – 1695, 2007. Wired/Wireless Internet Communications. 31
- [BS72] H.O. Burton and D.D. Sullivan. Errors and error control. *Proceedings of the IEEE*, 60(11) :1293–1301, Nov 1972. 55
- [BS10] E. Bulut and B.K. Szymanski. Friendship based routing in delay tolerant mobile social networks. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE*, pages 1–5, Dec 2010. 72
- [BSFC13] A.S. Brandao, M. Sarcinelli-Filho, and R. Carelli. Leader-following control of a uav-ugv formation. In *ICAR*, 2013. 18
- [BSH03] Fan Bai, Narayanan Sadagopan, and Ahmed Helmy. The {IMPORTANT} framework for analyzing the impact of mobility on performance of routing protocols for adhoc networks. *Ad Hoc Networks*, 1(4) :383 – 403, 2003. 70
- [BST13] Ilker Bekmezci, Ozgur Koray Sahingoz, and Samil Temel. Flying ad-hoc networks (fanets) : A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3) :1254 – 1270, 2013. 29, 36
- [BVD⁺09] C.A. Boano, T. Voigt, A. Dunkels, F. Osterlind, N. Tsiftes, L. Mottola, and P. Suarez. Poster abstract : Exploiting the lqi variance for rapid channel quality assessment. In *Information Processing in Sensor Networks, 2009. IPSN 2009. International Conference on*, pages 369–370, April 2009. 61
- [Car04] Jennifer Carlson. *Analysis of how mobile robots fail in the field*. Graduate school theses and dissertations, University of South Florida, 2004. 12
- [Cas07] Arnaud Casteigts. *Distributed algorithmics in mobile ad hoc networks - Local computations and dynamic graph relabelling systems*. PhD thesis, Universite Sciences et Technologies - Bordeaux I, Sep 2007. 78
- [Cas15] Arnaud Casteigts. Jbotsim : a tool for fast prototyping of distributed algorithms in dynamic networks. In *Proceedings of the 8nd international ICST conference on simulation tools and techniques, SIMUTools’15*, 2015. 93, 96
- [CBA06] E.A. Carlson, P.-P. Beaujean, and E. An. Location-aware routing protocol for underwater acoustic networks. In *OCEANS 2006*, pages 1–6, Sept 2006. 75
- [CBA07] E.A Carlson, P.P. Beaujean, and E An. An improved locaion-aware routing protocol for mobile underwater acoustic networks. In *IEEE OCEANS*, 2007. 65
- [CBD02] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC) : Special issue on Mobile Ad Hoc Networking : Research, Trends and Applications*, 2(5) :483–502, 2002. 22, 24

- [CCF⁺13] A. Caiti, V. Calabro, T. Fabbri, D. Fenucci, and A. Munafo. Underwater communication and distributed localization of auv teams. In *OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE*, pages 1–8, June 2013. 17
- [CCSC14] H.-H. Cho, C.-Y. Chen, T.K. Shih, and H.-C. Chao. Survey on underwater delay/disruption tolerant wireless sensor network routing. *Wireless Sensor Systems, IET*, 4(3) :112–121, September 2014. 75
- [CDA⁺10] N. Chand, T. DeLuck, J.H. Andrew, B.M. Eteson, T.M. Daniel, and R.T. Carlson. Compact low-cost non-rf communication solutions for unmanned ground vehicles. In *MILCOM 2010*, pages 1577–1582, Oct 2010. 26
- [CFQS11] Arnaud Casteigts, Paola Flocchini, Walter Quattrociocchi, and Nicola Santoro. Time-varying graphs and dynamic networks. In Hannes Frey, Xu Li, and Stefan Ruehrup, editors, *Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks*, volume 6811 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 346–359. Springer Berlin Heidelberg, 2011. 79
- [CGVS10] A.M. Cipriano, P. Gagneur, G. Vivier, and S. Sezginer. Overview of arq and harq in beyond 3g systems. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on*, pages 424–429, Sept 2010. 55
- [Cha07] J.P. Chanet. *Cooperative routing protocole with QoS for agri-environmental ad hoc networks*. Theses, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, April 2007. 69
- [CIB11] S. Chiaravalloti, F. Idzikowski, and L. Budzisz. Power consumption of wlan network elements. Technical Report TKN-11-002, Telecommunication Networks Group, Technische Universität Berlin, Aug 2011. 109
- [CJ03] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized link state routing protocol (olsr). RFC 3626, October 2003. 66
- [CJWK02] Kwan-Wu Chin, John Judge, Aidan Williams, and Roger Kermode. Implementation experience with manet routing protocols. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 32(5) :49–59, November 2002. 70
- [CLM⁺11] S. Chaumette, R. Laplace, C. Mazel, R. Mirault, A. Dunand, Y. Lecoutre, and J.-N. Perbet. Carus, an operational retasking application for a swarm of autonomous uavs : First return on experience. In *MILCOM*, 2011. 17
- [CM77] C.S. Clay and H. Medwin. *Acoustical Oceanography : Principles and Applications*. Wiley, 1977. 43
- [CM99] S. Corson and J. Macker. Mobile ad hoc networking (manet) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations. RFC 2501, Jan 1999. 29, 36
- [CMR04] D. Caltabiano, Giovanni Muscato, and F. Russo. Localization and self-calibration of a robot for volcano exploration. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 586–591 Vol.1, April 2004. 16
- [CMT⁺12] Ting-Yun Chi, Yi Ming, Tseng, Sy-Yen Kuo, and Chih-Chiun Liao. Civil uav path planning algorithm for considering connection with cellular data network. In *Computer and Information Technology (CIT), 2012 IEEE 12th International Conference on*, pages 327–331, Oct 2012. 16
- [Coa93] R. Coates. Underwater acoustic communications. In *OCEANS '93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings*, pages III420–III425 vol.3, Oct 1993. 46
- [Col] Collins. Dictionnary. <http://www.collinsdictionary.com/>. 15
- [CS13] Yue Cao and Zhili Sun. Routing in delay/disruption tolerant networks : A taxonomy, survey and challenges. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 15(2) :654–677, Second 2013. 70

- [CSC09] N. Chirdchoo, Wee-Seng Soh, and Kee Chaing Chua. Sector-based routing with destination location prediction for underwater mobile networks. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2009. WAINA '09. International Conference on*, pages 1148–1153, May 2009. 76
- [CW11] R.D. Christ and R.L. Wernli. *The ROV Manual : A User Guide for Observation Class Remotely Operated Vehicles*. Elsevier Science, 2011. 15
- [CWK⁺05] A. Cerpa, J.L. Wong, L. Kuang, M. Potkonjak, and D. Estrin. Statistical model of lossy links in wireless sensor networks. In *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on*, pages 81–88, April 2005. 63
- [CWPE05] Alberto Cerpa, Jennifer L. Wong, Miodrag Potkonjak, and Deborah Estrin. Temporal properties of low power wireless links : Modeling and implications on multi-hop routing. In *Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc '05*, pages 414–425, New York, NY, USA, 2005. ACM. 63
- [DCABM03] Douglas S. J. De Couto, Daniel Aguayo, John Bicket, and Robert Morris. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '03*, pages 134–146, New York, NY, USA, 2003. ACM. 59, 63, 90, 92
- [DCACM03] Douglas S. J. De Couto, Daniel Aguayo, Benjamin A. Chambers, and Robert Morris. Performance of multihop wireless networks : Shortest path is not enough. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 33(1) :83–88, January 2003. 59, 90
- [DDAOMN12] V. Del Duca Almeida, A.B. Oliveira, D.F. Macedo, and J.M.S. Nogueira. Performance evaluation of manet and dtn routing protocols. In *Wireless Days (WD), 2012 IFIP*, pages 1–6, Nov 2012. 72
- [Des11] Denis Dessales. *Conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation*. Phd thesis, Université de Poitiers, Dec 2011. 41
- [DF07] Michael Demmer and Kevin Fall. Dtlr : Delay tolerant routing for developing regions. In *Proceedings of the 2007 Workshop on Networked Systems for Developing Regions, NSDR '07*, pages 5 :1–5 :6, New York, NY, USA, 2007. ACM. 72
- [DH98] Jing Deng and Z.J. Haas. Dual busy tone multiple access (dbtma) : a new medium access control for packet radio networks. In *Universal Personal Communications, 1998. ICUPC '98. IEEE 1998 International Conference on*, volume 2, pages 973–977 vol.2, Oct 1998. 53
- [DHG⁺09] C. Danilov, T.R. Henderson, T. Goff, J.H. Kim, J. Macker, J. Weston, N. Neogi, A. Ortiz, and D. Uhlig. Experiment and field demonstration of a 802.11-based ground-uav mobile ad-hoc network. In *MILCOM*, pages 1–7, Oct 2009. 32
- [DNT12] L. Delosières and S. Nadjm-Tehrani. Batman store-and-forward : The best of the two worlds. In *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2012 IEEE International Conference on*, pages 721–727, March 2012. 127
- [DOD04] DOD. Airspace integration plan for unmanned aviation, Nov 2004. 11
- [DOD05] DOD. Unmanned aircraft systems roadmap 2005-2030, 2005. 12
- [DOD07] DOD. Unmanned systems roadmap 2007-2032, 2007. 36
- [DOD13] DOD. Unmanned systems integrated roadmap fy2013-2038, 2013. 13, 14
- [DOT04] DOT&E. Fy2004 annual report, 2004. 13, 14, 16
- [DW11] B. Dusza and C. Wietfeld. Qdv - a qos enabled packet scheduling scheme for mobile wimax in uav swarms. In *Computer Communications and Networks (ICCCN), 2011 Proceedings of 20th International Conference on*, pages 1–5, July 2011. 17

- [EBBS04] M.W. El Bahri, H. Boujernaa, and M. Siala. Performance comparison of type i, ii and iii hybrid arq schemes over awgn channels. In *Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 1417–1421 Vol. 3, Dec 2004. 55
- [Eis04] Henri Eisenbeiss. A mini unmanned aerial vehicle (uav) : system overview and image acquisition. In *Image Acquisition International Workshop on Processing and Visualization using High-Resolution Imagery*, 2004. 12
- [EOL⁺01] C.C. Eriksen, T.J. Osse, R.D. Light, T. Wen, T.W. Lehman, P.L. Sabin, J.W. Ballard, and A.M. Chiodi. Seaglider : a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 26(4) :424–436, Oct 2001. 108, 109
- [(ET)] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Universal mobile telecommunications system (umts) - selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the umts. tr 101 112 ed Umts 30.03 version 3.2.0, ETSI. 97
- [FAA13] FAA. Integration of civil unmanned aircraft systems (uas) in the national airspace system (nas) roadmap, 2013. 12
- [FCF⁺06] N. Fair, A.D. Chave, L. Freitag, J. Preisig, S.N. White, D. Yoerger, and F. Sonnichsen. Optical modem technology for seafloor observatories. In *OCEANS 2006*, pages 1–6, Sept 2006. 27
- [Fei09] Andrew Feickert. The army’s future combat system (fcs) : Background and issues for congress. Crs report for congress, Congressional Research Service, Aug 2009. 16
- [FGJL07] Rodrigo Fonseca, Omprakash Gnawali, Kyle Jamieson, and Philip Levis. Four-Bit Wireless Link Estimation. In *Proceedings of the Sixth Workshop on Hot Topics in Networks*, HotNets ’07, 2007. 63
- [FGLA95] Chane L. Fullmer and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Floor acquisition multiple access (fama) for packet-radio networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 25(4) :262–273, October 1995. 52
- [FGS⁺05] L. Freitag, M. Grund, S. Singh, J. Partan, P. Koski, and K. Ball. The whoi micro-modem : an acoustic communications and navigation system for multiple platforms. In *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, pages 1086–1092 Vol. 2, Sept 2005. 32, 108
- [Fil08] s. Fili. Wimax applications for utilities. livre blanc, WiMAX forum, Oct 2008. 28
- [FP05] E. Ferro and F. Potorti. Bluetooth and wi-fi wireless protocols : a survey and a comparison. *Wireless Communications, IEEE*, 12(1) :12–26, Feb 2005. 30
- [Fri46] H.T. Friis. A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5) :254–256, May 1946. 39, 41
- [FS00] L. Freitag and S. Singh. Multi-user frequency hopping underwater acoustic communication protocol. Technical report, WHOI, 2000. 32
- [Gag95] Douglas W. Gage. Ugv history 101 : A brief history of unmanned ground vehicle (ugv) development efforts. *Unmanned Systems*, 13 :9–32, 1995. 12, 13
- [GC13] Xiang Fa Guo and Mun Choon Chan. Plankton : An efficient dtn routing algorithm. In *SECON 2013 10th Annual IEEE Communications Society Conference on*, pages 550–558, June 2013. 114
- [GCW⁺08] Zheng Guo, G. Colombo, Bing Wang, Jun-Hong Cui, D. Maggiorini, and G.P. Rossi. Adaptive routing in underwater delay/disruption tolerant sensor networks. In *Wireless on Demand Network Systems and Services, 2008. WONS 2008. Fifth Annual Conference on*, pages 31–39, Jan 2008. 74, 76

- [Ger12] Jeremiah Gertler. U.s unmanned aerial systems. Report, Congressional Research Service, Jan 2012. 11, 12
- [GFJ⁺09] Omprakash Gnawali, Rodrigo Fonseca, Kyle Jamieson, David Moss, and Philip Levis. Collection tree protocol. In *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '09, pages 1–14, New York, NY, USA, 2009. ACM. 59
- [GFR06] Xiaoxing Guo, M.R. Frater, and M.J. Ryan. A propagation-delay-tolerant collision avoidance protocol for underwater acoustic sensor networks. In *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, pages 1–6, May 2006. 51
- [GHD⁺14] H. Gabteni, B. Hilt, F. Drouhin, J. Ledy, M. Basset, and P. Lorenz. A novel predictive link state indicator for ad-hoc networks. In *IEEE Globecom*, 2014. 62
- [GMP03] M. Gerla, L. Ma, and G. Pei. Landmark routing protocol (lanmar). RFC draft, May 2003. 67
- [GNM12] A. Gkikopouli, G. Nikolakopoulos, and S. Manesis. A survey on underwater wireless sensor networks and applications. In *Control Automation (MED), 2012 20th Mediterranean Conference on*, pages 1147–1154, July 2012. 37
- [GPV⁺10] E. Gallimore, J. Partan, I. Vaughn, S. Singh, J. Shusta, and L. Freitag. The whoi micromodem-2 : A scalable system for acoustic communications and networking. In *OCEANS 2010*, pages 1–7, Sept 2010. 109
- [Gre09] E. Gregersen. *Unmanned Space Missions*. An Explorer's Guide to the Universe. Britannica Educational Pub., 2009. 15
- [GT87] R. J. GASKINS and J. M. A. TANCHOCO. Flow path design for automated guided vehicle systems. *International Journal of Production Research*, 25(5) :667–676, 1987. 13
- [GT02] Matthias Grossglauser and D.N.C. Tse. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 10(4) :477–486, Aug 2002. 71
- [Gui08] Tesserault Guillaume. *Modélisation multi-fréquences du canal de propagation*. Phd thesis, Université de Poitiers, Dec 2008. 40
- [Haul] Z.J. Haas. The zone routing protocol (zrp) for ad hoc networks. RFC draft, 2002 Jul. 68
- [HF10] Tiansi Hu and Yunsi Fei. An adaptive and energy-efficient routing protocol based on machine learning for underwater delay tolerant networks. In *Modeling, Analysis Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 381–384, Aug 2010. 76, 77
- [HF13] Tiansi Hu and Yunsi Fei. An adaptive routing protocol based on connectivity prediction for underwater disruption tolerant networks. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE*, pages 65–71, Dec 2013. 77, 109
- [HFB09] J. Harri, F. Filali, and C. Bonnet. Mobility models for vehicular ad hoc networks : a survey and taxonomy. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 11(4) :19–41, Fourth 2009. 24
- [HK08] Daeyoup Hwang and Dongkyun Kim. Dfr : Directional flooding-based routing protocol for underwater sensor networks. In *OCEANS 2008*, pages 1–7, Sept 2008. 75
- [HLL12] P. Heinzer, V. Lenders, and F. Legendre. Fast and accurate packet delivery estimation based on dsss chip errors. In *IEEE INFOCOM*, 2012. 61, 62
- [ICA12] ICAO. Manual on remotely piloted aircraft systems (rpas), Apr 2012. 12
- [IEE99] Ieee standard for telecommunications and information exchange between systems - lan/man specific requirements - part 11 : Wireless medium access control (mac)

and physical layer (phy) specifications : High speed physical layer in the 5 ghz band. *IEEE Std 802.11a-1999*, pages 1–102, Dec 1999. 29

- [IEE00] Supplement to ieee standard for information technology- telecommunications and information exchange between systems- local and metropolitan area networks- specific requirements- part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications : Higher-speed physical layer extension in the 2.4 ghz band. *IEEE Std 802.11b-1999*, pages i–90, 2000. 29
- [IEE05] Ieee standard for information technology - telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks - specific requirements. - part 15.1 : Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for wireless personal area networks (wpans). *IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002)*, pages 1–580, 2005. 30
- [IEE06] Iso/iec 8802-11 :2005/amd4 [ieee std 802.11g-2003] information technology–local and metropolitan area networks– part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications–amendment 4 : Further higher data rate extension in the 2.4 ghz band. *ISO/IEC 8802-11 :2005/Amd.4 :2006(E) IEEE Std 802.11g-2003 (Amendment to IEEE Std 802.11-1999)*, pages 1–83, Aug 2006. 29
- [IEE09] Ieee recommended practice for information technology–telecommunications and information exchange between systems–local and metropolitan area networks–specific requirements part 15.5 : Mesh topology capability in wireless personal area networks (wpans). *IEEE Std 802.15.5-2009*, pages 1–166, May 2009. 31
- [IEE11a] Ieee standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems–local and metropolitan area networks–specific requirements part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment 10 : Mesh networking. *IEEE Std 802.11s-2011 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE 802.11k-2008, IEEE 802.11r-2008, IEEE 802.11y-2008, IEEE 802.11w-2009, IEEE 802.11n-2009, IEEE 802.11p-2010, IEEE 802.11z-2010, IEEE 802.11v-2011, and IEEE 802.11u-2011)*, pages 1–372, Sept 2011. 29
- [IEE11b] Ieee standard for local and metropolitan area networks–part 15.4 : Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, pages 1–314, Sept 2011. 30, 31
- [IEE12] Ieee standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks–specific requirements part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)*, pages 1–2793, March 2012. 55
- [Ins14] Woods Hole Oceanographic Institution. Remus auv. www.whoi.edu/osl/remus-auv, 2014. 108, 109
- [ISO] Underwater acoustic sensor network – part 1 : Reference model. 32
- [JFP04] Sushant Jain, Kevin Fall, and Rabin Patra. Routing in a delay tolerant network. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 34(4) :145–158, August 2004. 71
- [JHM07] D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz. The dynamic source routing protocol (dsr) for mobile ad hoc networks for ipv4. RFC 4728, Feb 2007. 68
- [JLT99] M. Jiang, J. Li, and Y.C. Tay. Cluster based routing protocol(cbrp). RFC draft, Aug 1999. 69
- [JSZ08] Josep Miquel Jornet, Milica Stojanovic, and Michele Zorzi. Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks. In *in Proc. of Third ACM International Workshop on Underwater Networks (WUWNeT’08) / MobiCom 2008*, 2008. 75

- [Kar90] Phil Karn. Maca : a new channel access method for packet radio. In *ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference*, pages 134–140, Sep 1990. 50
- [KCWG05] Jiejun Kong, Jun-Hong Cui, Dapeng Wu, and M. Gerla. Building underwater ad-hoc networks and sensor networks for large scale real-time aquatic applications. In *Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE*, pages 1535–1541 Vol. 3, Oct 2005. 37
- [Ken12] Farid Kendoul. Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems. *Journal of Field Robotics*, 29 :315–378, 2012. 12
- [KFI⁺10] K. Kurashiki, T. Fukao, K. Ishiyama, T. Kamiya, and N. Murakami. Orchard traveling ugv using particle filter based localization and inverse optimal control. In *System Integration (SII), 2010 IEEE/SICE International Symposium on*, pages 31–36, Dec 2010. 17
- [KKW⁺09] YoungBum Kim, JongHun Kim, YuPeng Wang, KyungHi Chang, Jong Won Park, and YongKon Lim. Application scenarios of nautical ad-hoc network for maritime communications. In *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future : Global and Local Challenges*, pages 1–4, Oct 2009. 37
- [KM07] N. Kushalnagar and G. Montenegro. Ipv6 over low-power wireless personal area networks (6lowpans) : Overview, assumptions, problem statement, and goals. RFC 4919, Aug 2007. 31
- [KNT06] E. Kuiper and S. Nadjm-Tehrani. Mobility models for uav group reconnaissance applications. In *Wireless and Mobile Communications, 2006. ICWMC '06. International Conference on*, pages 33–33, July 2006. 21, 23
- [KS71] L. Kleinrock and K. Stevens. Fisheye : A lenslike computer display transformation. Technical report, UCLA, Computer Science Department, 1971. 66
- [KS06] Kyu-Han Kim and Kang G. Shin. On accurate measurement of link quality in multi-hop wireless mesh networks. In *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '06*, pages 38–49, New York, NY, USA, 2006. ACM. 59
- [KSC91] M. Katevenis, S. Sidiropoulos, and C. Courcoubetis. Weighted round-robin cell multiplexing in a general-purpose atm switch chip. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 9(8) :1265–1279, Oct 1991. 118
- [KT75] L. Kleinrock and FA. Tobagi. Packet switching in radio channels : Part i-carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. *Communications, IEEE Transactions on*, 23(12) :1400–1416, Dec 1975. 49
- [Kwa13] P. Kwatra. Arq protocol studies in underwater communication networks. In *Signal Processing and Communication (ICSC), 2013 International Conference on*, pages 121–126, Dec 2013. 56
- [Lap12] Remi Laplace. *Applications and DTN services for cooperative UAVs fleet*. Theses, Universite Sciences et Technologies - Bordeaux I, December 2012. 79, 80, 144, 146
- [LC14] Tao Liu and Alberto E. Cerpa. Data-driven link quality prediction using link features. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 10(2) :37 :1–37 :35, January 2014. 61, 62
- [LDS03] Anders Lindgren, Avri Doria, and Olov Schelén. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 7(3) :19–20, July 2003. 72, 114
- [Led12] Jonathan Ledy. *Stratégie d'adaptation de liens sur canaux radios dynamiques pour les communications entre véhicules - Optimisation de la qualité de service*. Phd thesis, Université de Poitiers, Dec 2012. 40, 41

- [LLL07] Yunfeng Lin, Ben Liang, and Baochun Li. Performance modeling of network coding in epidemic routing. In *Proceedings of the 1st International MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking*, MobiOpp '07, pages 67–74, New York, NY, USA, 2007. ACM. 71
- [LMH⁺03] Dhananjay Lai, Arati Manjeshwar, F. Herrmann, E. Uysal-Biyikoglu, and A. Keshavarzian. Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks. In *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, volume 1, pages 446–452 Vol.1, Dec 2003. 63
- [LMS] I. Litovsky, Y. Métivier, and E. Sopena. Different local controls for graph relabeling systems. *Mathematical systems theory*, 28(1) :41–65. 77
- [LMS99] Igor Litovsky, Yves Métivier, and Éric Sopena. Handbook of graph grammars and computing by graph transformation. chapter Graph Relabelling Systems and Distributed Algorithms, pages 1–56. World Scientific Publishing Co., Inc., 1999. 77
- [LO06] F.M. Lussier and United States. Congressional Budget Office. *The Army's future combat systems program and alternatives*. CBO study. The Office, 2006. 13, 14
- [LQJ⁺07] T. Lei, Z. Qunwei, L. Jun, , and H. Xiaoyan. Smart : A selective controlled-flooding routing for delay tolerant networks. In *Broadband Communications, Networks and Systems, 2007. BROADNETS 2007. Fourth International Conference on*, pages 356–365, Sept 2007. 72
- [Lur98] X. Lurton. *Acoustique sous-marine : présentation et applications*. IFREMER, 1998. 27, 43
- [LW09] Cong Liu and Jie Wu. Scalable routing in cyclic mobile networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 20(9) :1325–1338, Sept 2009. 72
- [LWT⁺13] M. Langerwisch, T. Wittmann, S. Thamke, T. Remmersmann, A. Tiderko, and B. Wagner. Heterogeneous teams of unmanned ground and aerial robots for reconnaissance and surveillance - a field experiment. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2013 IEEE International Symposium on*, pages 1–6, Oct 2013. 18
- [LYL⁺07] Wei Liang, Haibin Yu, Lin Liu, Bangxiang Li, and Chang Che. Information-carrying based routing protocol for underwater acoustic sensor network. In *Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on*, pages 729–734, Aug 2007. 74
- [LZC10] Qinghua Li, Sencun Zhu, and Guohong Cao. Routing in socially selfish delay tolerant networks. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pages 1–9, March 2010. 72
- [LZZ⁺10] M.J. Lee, Rui Zhang, Jianliang Zheng, Gahng-Seop Ahn, Chunhui Zhu, Tae Park, Sung Rae Cho, Chang Sub Shin, and Jun Sun Ryu. Ieee 802.15.5 wpan mesh standard-low rate part : Meshing the wireless sensor networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 28(7) :973–983, September 2010. 31
- [Man08] J.E. Manley. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In *OCEANS 2008*, pages 1–4, Sept 2008. 14
- [MCK11] Victoria Manfredi, Mark Crovella, and Jim Kurose. Understanding stateful vs stateless communication strategies for ad hoc networks. In *Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '11, pages 313–324, New York, NY, USA, 2011. ACM. 126
- [MKHC07] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, and D. Culler. Transmission of ipv6 packets over ieee 802.15.4 networks. RFC 4944, Sep 2007. 31
- [MKL⁺07] E. Magistretti, Jiejun Kong, Uichin Lee, M. Gerla, P. Bellavista, and A. Corradi. A mobile delay-tolerant approach to long-term energy-efficient underwater sensor networking. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE*, pages 2866–2871, March 2007. 75

- [MM09] M. Musolesi and C. Mascolo. Car : Context-aware adaptive routing for delay-tolerant mobile networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 8(2) :246–260, Feb 2009. 126
- [MM11] F. Maan and N. Mazhar. Manet routing protocols vs mobility models : A performance evaluation. In *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2011 Third International Conference on*, pages 179–184, June 2011. 70
- [MMA⁺12] Haining Mo, A.C. Mingir, H. Alhumyani, Y. Albayram, and Jun-Hong Cui. Uw-harq : An underwater hybrid arq scheme : Design, implementation and initial test. In *Oceans, 2012*, pages 1–5, Oct 2012. 56
- [MRdS⁺12] P. McGillivray, K. Rajan, J.B. de Sousa, F. Leroy, and R. Martins. Integrating autonomous underwater vessels, surface vessels and aircraft as persistent surveillance components of ocean observing studies. In *Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2012 IEEE/OES*, pages 1–5, Sept 2012. 18
- [MS06] M. Molins and M. Stojanovic. Slotted fama : a mac protocol for underwater acoustic networks. In *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, pages 1–7, May 2006. 53
- [NA08] Heungwoo Nam and Sunshin An. Energy-efficient routing protocol in underwater acoustic sensor networks. In *Embedded and Ubiquitous Computing, 2008. EUC '08. IEEE/IFIP International Conference on*, volume 2, pages 663–669, Dec 2008. 75
- [NASa] NASA. H-ii transfer vehicle (htv). www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/htv.html#.UycY8IX99ek. 15
- [NASb] NASA. Russian progress spacecraft. www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/progress.html#.UycYkYX99e. 15
- [Nav] Navy. The navy unmanned undersea vehicle (uuv) master plan. 15
- [Nav07] Navy. The navy unmanned surface vehicle (usv) master plan, Jul 2007. 14, 15
- [NGHD01] J. Nemeroff, L. Garcia, D. Hampel, and S. DiPierro. Application of sensor network communications. In *Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for Network-Centric Operations : Creating the Information Force. IEEE*, volume 1, pages 336–341 vol.1, 2001. 13
- [NHT09] Phuoc-Nguyen Nguyen-Huu and Joshua Titus. Reliability and failure in unmanned ground vehicle (ugv). Technical report, university of michigan, Jan 2009. 12
- [NIS08] NIST. Autonomy levels for unmanned systems (alfus) framework ,volume i : Terminology, Oct 2008. 1, 10
- [NSM08] Hai-Heng Ng, Wee-Seng Soh, and M. Motani. Maca-u : A media access protocol for underwater acoustic networks. In *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*, pages 1–5, Nov 2008. 51, 52
- [NSX⁺07] N. Nicolaou, A. SEE, Peng Xie, Jun-Hong Cui, and D. Maggiorini. Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks. In *OCEANS 2007 - Europe*, pages 1–6, June 2007. 75
- [OAT06] A.K. Othman, A.E. Adams, and C.C. Tsimenidis. Node discovery protocol and localization for distributed underwater acoustic networks. In *Telecommunications, 2006. AICT-ICIW '06. International Conference on Internet and Web Applications and Services/Advanced International Conference on*, pages 93–93, Feb 2006. 65
- [OKD06] Jörg Ott, Dirk Kutscher, and Christoph Dwertmann. Integrating dtn and manet routing. In *Proceedings of the 2006 SIGCOMM Workshop on Challenged Networks, CHANTS '06*, pages 221–228, New York, NY, USA, 2006. ACM. 127
- [OTA04] OTAN. Nato standardization agreement 7085, 2004. 1
- [OTA12] OTAN. Nato standardization agreement 4586, 2012. 1

- [OTL04] R. Ogier, F. Templin, and M. Lewis. Topology dissemination based on reverse-path forwarding (tbrpf). RFC 3684, Feb 2004. 67
- [Oxf] Oxford. Oxford dictionaries language matters. 15
- [PAG⁺14] J. Potter, J. Alves, D. Green, G. Zappa, I. Nissen, and K. McCoy. The janus underwater communications standard. In *Underwater Communications and Networking (UComms), 2014*, pages 1–4, Sept 2014. 32
- [Par00] J.D. Parsons. *The Mobile Radio Propagation Channel*. Wiley, second edition, Oct 2000. 39
- [PBRD03] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das. Ad hoc on-demand distance vector (aodv). RFC 3561, July 2003. 67
- [PGC00] Guangyu Pei, M. Gerla, and Tsu-Wei Chen. Fisheye state routing : a routing scheme for ad hoc wireless networks. In *Communications, 2000. ICC 2000. 2000 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 70–74 vol.1, 2000. 66
- [PKZ⁺08] J.S. Pathmasuntharam, Peng-Yong Kong, Ming-Tuo Zhou, Yu Ge, Haiguang Wang, Chee-Wei Ang, Wen Su, and H. Harada. Triton : High speed maritime mesh networks. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, pages 1–5, Sept 2008. 24, 26
- [PLMD12] Daan Pareit, Bart Lannoo, Ingrid Moerman, and Piet Demeester. The history of wimax : A complete survey of the evolution in certification and standardization for ieee 802.16 and wimax. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 14(4) :1183–1211, Fourth 2012. 28
- [PPC06] L. Pelusi, A. Passarella, and M. Conti. Opportunistic networking : data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks. *Communications Magazine, IEEE*, 44(11) :134–141, November 2006. 70
- [PS07] B. Peleato and M. Stojanovic. Distance aware collision avoidance protocol for ad-hoc underwater acoustic sensor networks. *Communications Letters, IEEE*, 11(12) :1025–1027, December 2007. 53
- [PS13] Ashish Patil and Milica Stojanovic. A node discovery protocol for ad hoc underwater acoustic networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 13(3) :277–295, 2013. 44, 65
- [PSRS01] J.G. Proakis, E.M. Sozer, J.A. Rice, and M. Stojanovic. Shallow water acoustic networks. *Communications Magazine, IEEE*, 39(11) :114–119, Nov 2001. 64
- [PTLD09] I. Papapanagiotou, D. Toumpakaris, Jungwon Lee, and M. Devetsikiotis. A survey on next generation mobile wimax networks : objectives, features and technical challenges. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 11(4) :3–18, Fourth 2009. 28
- [PTM⁺10] Ranju Pant, Apinun Tunpan, Preechai Mekbungwan, Rujipol Virochpoka, and Kanchana Kanchanasut. Dtn overlay on olsr network. In *Proceedings of the Sixth Asian Internet Engineering Conference, AINTEC '10*, pages 56–63, New York, NY, USA, 2010. ACM. 127
- [Pä03] Matthias Pätzold. *Mobile Fading Channels*. Wiley, 2003. 42
- [QC] A. Quartulli and Lo C. Client announcement and fast roaming in a layer-2 mesh network. 127
- [QS10] N.B. Qadri and G.A. Shah. Performance evaluation of ad-hoc routing protocols in underwater acoustic sensor networks. In *Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), 2010 19th Annual*, pages 1–6, May 2010. 73
- [RCF⁺01] J. A. Rice, R.K. Creber, C. L. Fletcher, P.A. Baxley, D.C. Davison, and K. E. Rogers. Deaweb underwater acoustic nets. In *SSC San Diego Biennial Review*, Aug 2001. 64

- [REWT11] Christian Renner, Sebastian Ernst, Christoph Weyer, and Volker Turau. Prediction accuracy of link-quality estimators. In *Proceedings of the 8th European Conference on Wireless Sensor Networks*, EWSN'11, pages 1–16, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer-Verlag. 60, 64, 102, 132, 184
- [RH10] George F. Riley and Thomas R. Henderson. *Modeling and Tools for Network Simulation*, chapter The ns-3 Network Simulator, pages 15–34. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. 86, 97
- [RO10] J.A. Rice and Chee Wei Ong. A discovery process for initializing underwater acoustic networks. In *Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), 2010 Fourth International Conference on*, pages 408–415, July 2010. 64, 65
- [Rob75] Lawrence G. Roberts. Aloha packet system with and without slots and capture. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 5(2) :28–42, April 1975. 48
- [RW08] S. Rowe and C. Wagner. An introduction to the joint architecture for unmanned systems (jaus). Technical report, Cybernet Systems Corporation, 2008. 1, 7, 34, 85, 160
- [SAAS14] S. Sotheara, K. Aso, N. Aomi, and S. Shimamoto. Effective data gathering and energy efficient communication protocol in wireless sensor networks employing uav. In *IEEE WCNC*, 2014. 16
- [SB98] Richard S. Sutton and Andrew G. Barto. *Introduction to Reinforcement Learning*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1st edition, 1998. 110, 112
- [SBC⁺10] Guanpu Shen, Xiaojuan Ban, Zheng Chang, Shansong Shi, and Shuxin Chen. A monocular vision localization method based on unmanned underground mining vehicle using barcode. In *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on*, pages 1071–1075, July 2010. 13
- [Sch12] Michael N. Schmitt. Unmanned combat aircraft systems and international humanitarian law : Simplifying the oft benighted debate. *Boston University International Law Journal*, 30 :595, 2012. 12
- [SCL⁺07] M. Senel, K. Chintalapudi, D. Lal, A. Keshavarzian, and E.J. Coyle. A kalman filter based link quality estimation scheme for wireless sensor networks. In *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07. IEEE*, pages 875–880, Nov 2007. 61
- [SCO13] M. Shaukat, M. Chitre, and Sim Heng Ong. A bio-inspired distributed approach for searching underwater acoustic source using a team of auvs. In *OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE*, pages 1–10, June 2013. 17
- [SDTL10] Kannan Srinivasan, Prabal Dutta, Arsalan Tavakoli, and Philip Levis. An empirical study of low-power wireless. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 6(2) :16 :1–16 :49, March 2010. 61
- [SFT00] R. Schiavon, R. Finotello, and T. Terribile. The supervisory control of aramis, a system for robotic inspection of sediments. In *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 2, pages 823–828 vol.2, 2000. 17
- [SKH06] Dongjin Son, Bhaskar Krishnamachari, and John Heidemann. Experimental study of concurrent transmission in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '06, pages 237–250, New York, NY, USA, 2006. ACM. 61
- [SKH⁺13] A.M. Samad, N. Kamarulzaman, M.A. Hamdani, T.A. Mastor, and K.A. Hashim. The potential of unmanned aerial vehicle (uav) for civilian and mapping application. In *System Engineering and Technology (ICSET), 2013 IEEE 3rd International Conference on*, pages 313–318, Aug 2013. 16

- [SL06] Kannan Srinivasan and Philip Levis. Rssi is under appreciated. In *In Proceedings of the Third Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets)*, 2006. 61
- [SLG13] Michael Spuhler, Vincent Lenders, and Domenico Giustiniano. Blitz : Wireless link quality estimation in the dark. In Piet Demeester, Ingrid Moerman, and Andreas Terzis, editors, *Wireless Sensor Networks*, volume 7772 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 99–114. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 62
- [SM99] C. Schuler and M. Mateescu. Performance evaluation of arq protocols for realtime services in ieee 802.11 and wireless atm. In *ACTS Mobile Communications*, Jun 1999. 55
- [SMLH09] E.T. Steimle, R.R. Murphy, M. Lindemuth, and M.L. Hall. Unmanned marine vehicle use at hurricanes wilma and ike. In *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future : Global and Local Challenges*, pages 1–6, Oct 2009. 17, 18
- [SNI05] Ryo Sugiura, Noboru Noguchi, and Kazunobu Ishii. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosystems Engineering*, 90(4) :369 – 379, 2005. 12
- [SPR08a] Thrasyvoulos Spyropoulos, K. Psounis, and C.S. Raghavendra. Efficient routing in intermittently connected mobile networks : The single-copy case. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 16(1) :63–76, Feb 2008. 71
- [SPR08b] Thrasyvoulos Spyropoulos, Konstantinos Psounis, and Cauligi S. Raghavendra. Efficient routing in intermittently connected mobile networks : The multiple-copy case. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 16(1) :77–90, February 2008. 71
- [SRK10] N. Salman, I. Rasool, and A.H. Kemp. Overview of the ieee 802.15.4 standards family for low rate wireless personal area networks. In *Wireless Communication Systems (ISWCS), 2010 7th International Symposium on*, pages 701–705, Sept 2010. 30
- [SSCM05] Dongqing Shi, Majura F Selekwa, Jr. Collins, E.G., and C.A. Moore. Fuzzy behavior navigation for an unmanned helicopter in unknown environments. In *Systems, Man and Cybernetics, 2005 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3897–3902 Vol. 4, Oct 2005. 12
- [SSL07] Peng Sun, W.K.G. Seah, and P.W.Q. Lee. Efficient data delivery with packet cloning for underwater sensor networks. In *Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 2007. Symposium on*, pages 34–41, April 2007. 74
- [SSN08] Vijay K. Shetty, Moises Sudit, and Rakesh Nagi. Priority-based assignment and routing of a fleet of unmanned combat aerial vehicles. *Computers & Operations Research*, 35(6) :1813 – 1828, 2008. Part Special Issue : {OR} Applications in the Military and in Counter-Terrorism. 12
- [ST06] Winston K. G. Seah and Hwee Pink Tan. Multipath virtual sink architecture for wireless sensor networks in harsh environments. In *Proceedings of the First International Conference on Integrated Internet Ad Hoc and Sensor Networks*, InterSense '06, New York, NY, USA, 2006. ACM. 74
- [Sto03] Milica Stojanovic. *Acoustic (Underwater) Communications*. John Wiley & Sons, Inc., 2003. 27
- [Sto05] M. Stojanovic. Optimization of a data link protocol for an underwater acoustic channel. In *Oceans 2005 - Europe*, volume 1, pages 68–73 Vol. 1, June 2005. 56
- [Sto07] M. Stojanovic. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 11(4) :34–43, October 2007. 44
- [Swi13] SwissLog. Healthcare solutions transcar automated guided vehicle, Jun 2013. 13

- [SYH08a] A.A. Syed, Wei Ye, and J. Heidemann. Comparison and evaluation of the t-lohi mac for underwater acoustic sensor networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 26(9) :1731–1743, December 2008. 53
- [SYH08b] A.A. Syed, Wei Ye, and J. Heidemann. T-lohi : A new class of mac protocols for underwater acoustic sensor networks. In *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pages –, April 2008. 53
- [SZT04] Felix Schill, Uwe R. Zimmer, and Jochen Trumppf. Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications. In *In : Proc. of Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2004. 27
- [TGS⁺08] A. Tiwari, A. Ganguli, Ashwin Sampath, D.S. Anderson, Bao-Hong Shen, N. Krishnamurthi, J. Yadegar, M. Gerla, and D. Krzysiak. Mobility aware routing for the airborne network backbone. In *Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE*, pages 1–7, Nov 2008. 21, 22, 23
- [Tho03] *Design of an agile unmanned combat vehicle : a product of the DARPA UGCV program*, volume 5083, 2003. 13
- [Toh01] C.K. K Toh. *Ad Hoc Wireless Networks : Protocols and Systems*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 1st edition, 2001. 47
- [Tra15] L. Tracy. Uan framework. nsnam.org/docs/release/3.21/models/html/uan, May 2015. 24
- [TS14] P. Thulasiraman and Y. Sagir. Dynamic bandwidth provisioning using markov chain based rsvp for unmanned ground networks. In *Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), 2014 IEEE International Inter-Disciplinary Conference on*, pages 130–136, March 2014. 17
- [TTSC03] C.A.U.G.V. Technology, B.A.S. Technology, D.E.P. Sciences, and N.R. Council. *Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles*. National Academies Press, 2003. 14
- [vAAA⁺01] C. von Alt, B. Allen, T. Austin, N. Forrester, R. Goldsborough, M. Purcell, and R. Stokely. Hunting for mines with remus : a high performance, affordable, freeswimming underwater robot. In *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 1, pages 117–122 vol.1, 2001. 17
- [VB00] Amin Vahdat and David Becker. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks. Technical report, Duke University, 2000. 71
- [Vis06] Iris F.A. Vis. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research*, 170(3) :677 – 709, 2006. 13
- [WC03] Alec Woo and David Culler. Evaluation of efficient link reliability estimators for low-power wireless networks. Technical Report UCB/CSD-03-1270, EECS Department, University of California, Berkeley, 2003. 63
- [WC10] John Whitbeck and Vania Conan. HYMAD : hybrid DTN-MANET routing for dense and highly dynamic wireless networks. *CoRR*, abs/1001.3405, 2010. 126
- [WCZ⁺08] Liguu Weng, WenChuan Cai, Ran Zhang, M. Bikdash, and Y.D. Song. Immunology-inspired swarm coordination with application to multiple combat ugv systems. In *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on*, pages 3293–3298, June 2008. 17
- [WDD⁺10] A.G. Winter, R.L.H. Deits, D.S. Dorsch, A.E. Hosoi, and A.H. Slocum. Teaching roboclam to dig : The design, testing, and genetic algorithm optimization of a biomimetic robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4231–4235, Oct 2010. 13

- [WGW10] Wei Wang, Xiaohong Guan, Beizhan Wang, and Yaping Wang. A novel mobility model based on semi-random circular movement in mobile ad hoc networks. *Information Sciences*, 180(3) :399 – 413, 2010. 21, 23
- [WH60] J.M. Wozencraft and M. Horstein. Digitalised communication over two-way channels. In *The fourth London Symposium of Information Theory*, 1960. 55
- [WH61] J.M. Wozencraft and M. Horstein. coding for two-way channels. Technical report, Research Laboratory of Electronics M.I.T, 1961. 55
- [WJMF05] Yong Wang, Sushant Jain, Margaret Martonosi, and Kevin Fall. Erasure-coding based routing for opportunistic networks. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking*, WDTN '05, pages 229–236, New York, NY, USA, 2005. ACM. 71
- [WMP07] Yong Wang, Margaret Martonosi, and Li-Shiuan Peh. Predicting link quality using supervised learning in wireless sensor networks. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 11(3) :71–83, July 2007. 64
- [WNZF13] Yan Wan, K. Namuduri, Yi Zhou, and Shengli Fu. A smooth-turn mobility model for airborne networks. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 62(7) :3359–3370, Sept 2013. 21, 23
- [WU97] W. W. WU. Satellite communications. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 85(6) :998–1010, Jun 1997. 27
- [WVKV90] B.T. Whitten, P. Veraart, A. Kwasniewski, and K. Vollenwyder. Automated underground haulage truck, 1990. 13
- [XCL06] Peng Xie, Jun-Hong Cui, and Li Lao. Vbf : Vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks. In Fernando Boavida, Thomas Plagemann, Burkhard Stiller, Cedric Westphal, and Edmundo Monteiro, editors, *NETWORKING 2006. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems*, volume 3976 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1216–1221. Springer Berlin Heidelberg, 2006. 75
- [XL06] Yingqi Xu and W.-C. Lee. Exploring spatial correlation for link quality estimation in wireless sensor networks. In *Pervasive Computing and Communications, 2006. PerCom 2006. Fourth Annual IEEE International Conference on*, pages 10 pp.–211, March 2006. 64
- [XWK⁺14] Junfei Xie, Yan Wan, J.H. Kim, Shengli Fu, and K. Namuduri. A survey and analysis of mobility models for airborne networks. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 16(3) :1221–1238, Third 2014. 21
- [YCXC14] Jianghua Yu, Huifang Chen, Lei Xie, and Jun-Hong Cui. Performance analysis of hybrid arq schemes in underwater acoustic networks. In *Oceans - St. John's, 2014*, pages 1–6, Sept 2014. 56
- [YSC08] Hai Yan, ZhijieJerry Shi, and Jun-Hong Cui. Dbr : Depth-based routing for underwater sensor networks. In Amitabha Das, HungKeng Pung, FrancisBuSung Lee, and LawrenceWaiChoong Wong, editors, *NETWORKING 2008 Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet*, volume 4982 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 72–86. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 76
- [Zad75] L.A. Zadeh. Fuzzy logic and approximate reasoning. *Synthese*, 30(3-4) :407–428, 1975. 64
- [Zha06] Zhensheng Zhang. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks : overview and challenges. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 8(1) :24–37, First 2006. 70

- [ZK07] Marco Zúñiga Zamalloa and Bhaskar Krishnamachari. An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 3(2), June 2007. 61
- [ZL13] K. Zhao and Y. Li. Path planning in large-scale indoor environment using rrt. In *Chinese Control Conference*, 2013. 17
- [ZLC13] Song Zhang, Deshi Li, and Jian Chen. A link-state based adaptive feedback routing for underwater acoustic sensor networks. *Sensors Journal, IEEE*, 13(11) :4402–4412, Nov 2013. 76
- [ZLWT12] Wenqian Zang, Jiayuan Lin, Yangchun Wang, and Heping Tao. Investigating small-scale water pollution with uav remote sensing technology. In *World Automation Congress (WAC), 2012*, pages 1–4, June 2012. 16
- [ZSA09] Hongwei Zhang, Lifeng Sang, and Anish Arora. Comparison of data-driven link estimation methods in low-power wireless networks. In *IEEE SECON'09*, pages 369–377, Piscataway, NJ, USA, 2009. IEEE Press. 63
- [ZXM⁺12] Shengyan Zhou, Junqiang Xi, Matthew W. McDaniel, Takayuki Nishihata, Phil Salleses, and Karl Iagnemma. Self-supervised learning to visually detect terrain surfaces for autonomous robots operating in forested terrain. *Journal of Field Robotics*, 29(2) :277–297, 2012. 17

Processus suivi par les nœuds leaders et esclaves

```

graph TD
    Start([Réception et mise à jour du jeton]) --> Q1{Ensemble des noeuds découverts ?}
    Q1 -- Oui --> Q2{Voisins plus proche que le leader précédent ?}
    Q1 -- Non --> Q3{Ais je été leader ?}
    Q3 -- Oui --> A((A))
    Q3 -- Non --> Note[Note adresse du précédent leader]
    Note --> Power[Puissance d'émission au minimum]
    Power --> Phase[Phase de découverte, attente d'une réponse]
    Phase --> Update[mettre à jour le jeton, si non fait]
    Update --> Coll{Détection d'une collision ?}
    Coll -- Oui --> Recov[Recouvrement de la collision, attente d'une réponse]
    Recov --> Coll
    Coll -- Non --> List[Mise à jour de la liste des contacts]
    List --> NewNodes[Nouveaux noeuds trouvés (non marqués sur le jeton)]
    A --> NewNodes
    NewNodes -- "Quelque noeuds" --> Pass[Passage du jeton au voisin le plus proche, phase d'écoute]
    Pass --> Q1
    
    subgraph Loop [ ]
        direction TB
        Q2 -- Oui --> Fin([Fin])
        Q2 -- Non --> AugTX[Augmentation de la puissance TX, inférieure à celle du leader précédent ?]
        AugTX -- Oui --> Fin
        AugTX -- Non --> Wait[Attente d'une réponse, mise à jour de liste de contacts]
        Wait --> Q2
    end
    
    Wait --> Q4{Est ce le dernier noeud ? voir jeton}
    Q4 -- Non --> Reton[Retourner le jeton au leader précédent, phase d'écoute]
    Reton --> Phase
    Q4 -- Oui --> Mark[Marquer le jeton par un indicateur de fin]
    Mark -- Oui --> Max{Puissance Max atteinte ?}
    Max -- Non --> AugPower[Augmentation de la puissance d'émission]
    AugPower --> Max
    Max -- Oui --> Mark
    AugPower --> Q4

```

181

A.2 Schéma du processus suivi par un nœud esclave

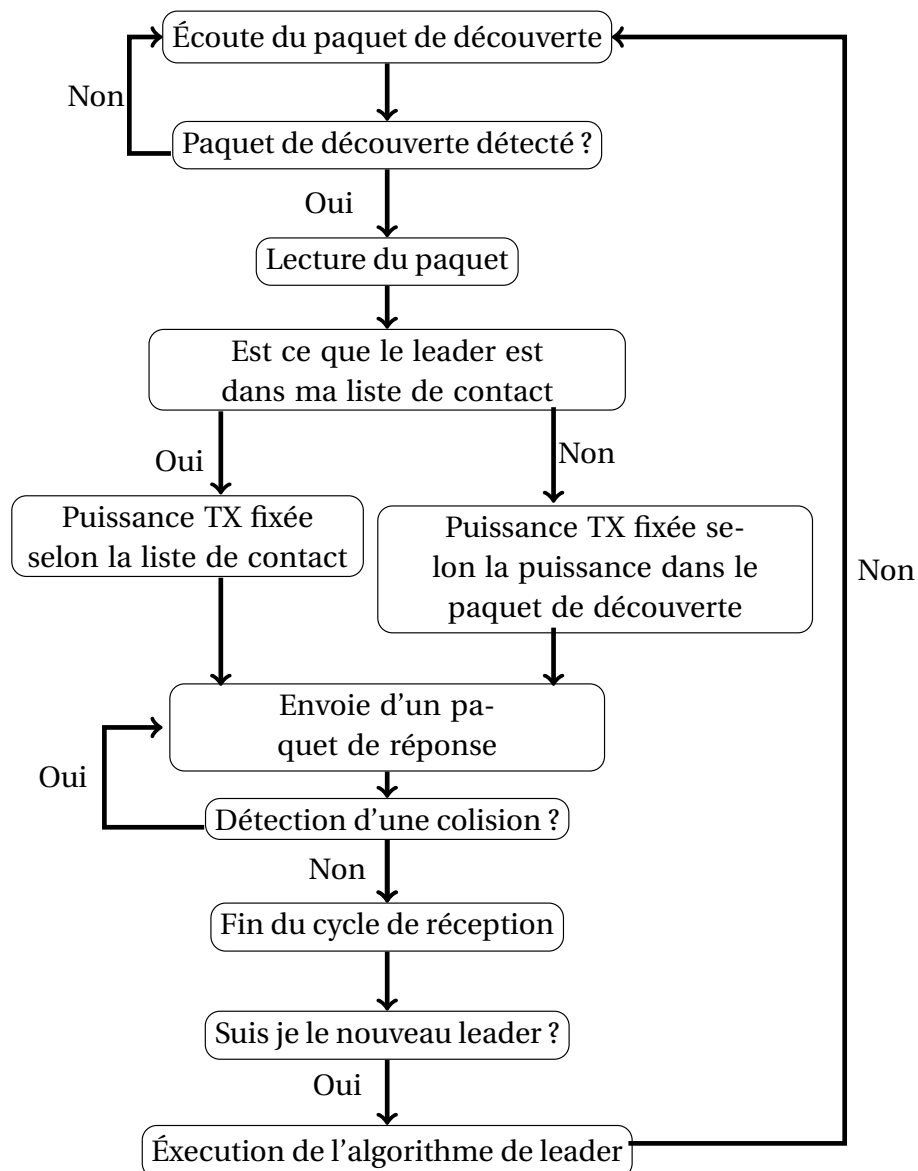


FIGURE A.2 – Algorithme d'un nœud esclave

Annexe B

Détail du calcul des estimateurs F-LQE et HoPS

Nous détaillons dans cette section le calcul des estimateurs F-LQE et HoPS, que nous utilisons pour comparer les performances des estimateurs de F-ETX dans le chapitre 5.

B.1 F-LQE

F-LQE est composé de quatre estimateurs chacun évaluant une propriété différente du lien.

La premier estimateur effectue une moyenne du taux de réception des paquets reçus (PRR) avec un filtre de type WMEWMA afin de déterminer la qualité du lien. La formule ci-dessous montre l'utilisation du filtre WMEWMA sur le PRR :

$$\text{WMEWMA}(\alpha, \omega) = \alpha \times \text{WMEWMA} + (1 - \alpha) \times \text{PRR} \quad (\text{B.1})$$

Avec α compris entre 0 et 1 qui est la pondération accordée aux valeurs nouvelles ou anciennes et ω , la taille de l'historique des valeurs utilisées par le filtre. Baccours et al dans [BKY⁺10] fixent ces paramètres à $\alpha = 0.6$ et $\omega = 5$. Par conséquent l'estimateur SPRR est calculé par :

$$\text{SPRR} = 0.6 \times \text{SPRR} + (1 - 0.6) \times \text{PRR} \quad (\text{B.2})$$

L'indicateur de présence de liens unidirectionnels est calculé en observant la différence entre le PRR calculé à partir des cinq derniers paquets reçus du lien montant, PRR_{up} , et descendant PRR_{down} . L'estimateur ASL se calcule donc :

$$\text{ASL}(\omega) = |\text{PRR}_{up} - \text{PRR}_{down}| \quad (\text{B.3})$$

Avec $\omega = 5$ [BKY⁺10].

L'estimateur de stabilité quant à lui observe la variation du PRR pour déterminer la stabilité du lien. Pour cela, l'estimateur calcule le coefficient de variation sur les trente derniers PRR calculés. Néanmoins, tant que cet historique n'a pas été constitué, l'estimateur se base sur un historique de cinq PRR. L'estimateur de stabilité se calcule donc selon la formule suivante :

$$\text{SF}(\omega) = \frac{\sigma}{\mu(\omega)} \quad (\text{B.4})$$

Avec σ la valeur de l'écart type et μ la moyenne des PRR calculée à partir d'un historique de taille ω .

Contrairement aux autres estimateurs, le dernier estimateur se base sur une information physique, le SNR. L'estimation a pour objectif de quantifier la qualité du canal de transmission en se basant sur les dernières mesures du SNR effectuées. Pour cela l'estimateur maintient un historique de taille ω .

B.2 HoPS

HoPS est composé de quatre estimateurs que nous décrivons ci-dessous.

Le premier estimateur estime la qualité de lien à court terme en utilisant le filtre EWMA :

$$h_{\tau}^{ST} = \alpha \cdot h_{\tau-1}^{ST} + (1 - \alpha) \cdot q_{\tau}. \quad (B.5)$$

Avec α la pondération accordée aux valeurs nouvelles ou anciennes et q_{τ} , une valeur binaire indiquant la réception ou la perte du paquet attendu à l'instant τ . Dans leurs expérimentations [REWT11] les auteurs fixent le paramètre α à 0.9.

Le second estimateur est obtenu en appliquant une seconde fois le filtre EWMA sur l'estimation à court terme h_{τ}^{ST} :

$$h_{\tau}^{LT} = \beta \cdot h_{\tau-1}^{LT} + (1 - \beta) \cdot h_{\tau}^{ST}. \quad (B.6)$$

Le coefficient β est fixé dans [REWT11] à 0.997.

Afin d'étudier la dynamique du lien, HoPS possède deux estimateurs qui sont basés sur les variations entre l'estimateur à court et à long terme.

$$\begin{aligned} \delta_{\tau}^{+} &= \gamma \cdot \delta_{\tau-1}^{+} + (1 - \gamma) \cdot \varphi(h_{\tau}^{ST}, h_{\tau}^{LT}) \\ \delta_{\tau}^{-} &= \gamma \cdot \delta_{\tau-1}^{-} + (1 - \gamma) \cdot \varphi(h_{\tau}^{LT}, h_{\tau}^{ST}) \\ \text{avec } \varphi(x, y) &= \begin{cases} x - y & \text{si } x > y \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned} \quad (B.7)$$

Avec γ fixé à 0.997 [REWT11]. L'estimation de la stabilité du lien est calculée en déterminant la déviation absolue entre l'estimation à court et à long terme :

$$h_{\tau}^{\sigma} = \delta_{\tau}^{+} + \delta_{\tau}^{-} \quad (B.8)$$

Enfin le dernier estimateur se base sur ces variations afin d'indiquer la tendance de qualité :

$$h_{\tau}^{\sigma} = \delta_{\tau}^{+} - \delta_{\tau}^{-} \quad (B.9)$$

