



HAL
open science

Routage basé sur le contenu dans les réseaux ad-hoc aéronautiques

Mickaël Royer

► **To cite this version:**

Mickaël Royer. Routage basé sur le contenu dans les réseaux ad-hoc aéronautiques. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Toulouse 3 Paul Sabatier, 2016. Français. NNT: . tel-01337568

HAL Id: tel-01337568

<https://theses.hal.science/tel-01337568>

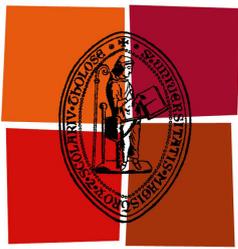
Submitted on 27 Jun 2016

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*

Présentée et soutenue le *30/05/2016* par :

MICKAËL ROYER

**Routage basé sur le contenu dans les réseaux ad-hoc
aéronautiques**

JURY

EMMANUELLE ANCEAUME	Chargé de Recherche
MARCELO DIAS DE AMORIM	Directeur de recherche CNRS
FABIEN GARCIA	Enseignant-Chercheur
ZOUBIR MAMMERI	Professeur d'Université
MICHEL MAROT	Professeur
THOMAS NOEL	Professeur d'Université
ALAIN PIROVANO	Enseignant-Chercheur

École doctorale et spécialité :

EDSYS : Informatique 4200018

Unité de Recherche :

Groupe de recherche ResCo du Laboratoire Telecom, ENAC

Directeur(s) de Thèse :

Fabien GARCIA et Alain PIROVANO

Rapporteurs :

Thomas NOEL et Marcelo DIAS DE AMORIM

Résumé

Dans un contexte de besoins croissants de moyens de communication pour augmenter la sécurité des vols et répondre aux attentes des compagnies et des passagers, le monde de l'aviation civile cherche de nouveaux systèmes de communication pouvant répondre à ces objectifs. Les réseaux ad-hoc aéronautiques, AANET (Aeronautical Ad hoc NETWORKS) représentent une approche innovante pour répondre à cette problématique. Il s'agit de réseaux auto-configurés, n'utilisant pas d'infrastructure fixe et dont la spécificité réside dans le fait que les nœuds composant le réseau sont des avions commerciaux. Les AANET peuvent être vus comme un sous ensemble des VANET (Vehicular Ad-Hoc Networks) puisqu'ils partagent de nombreuses caractéristiques comme les contraintes imposées sur les trajectoires.

Afin d'utiliser le plus efficacement ces réseaux mobiles tout en répondant aux besoins de nouvelles applications, telle que l'information météorologique temps réel sur des phénomènes dangereux, qui nécessitent des communications d'avion à avion, la proposition avancée dans cette thèse est d'utiliser le paradigme du routage basé sur le contenu au dessus des AANET. Dans ce type de routage, ce n'est plus une adresse de destination qui est utilisée pour joindre le ou les correspondants, mais le contenu du message qui permet de décider des destinataires. Dans ce paradigme, un émetteur envoie un message possédant des attributs et le message est alors transmis par le réseau uniquement aux terminaux intéressés par le contenu du message. Appliqué à l'information météorologique, cette approche permet à un aéronef détectant un phénomène dangereux tel qu'un orage de prévenir uniquement les avions intéressés par cet événement, c'est à dire ceux dont la trajectoire passe près de l'orage dans le temps de vie du phénomène.

Dans cette thèse, nous avons choisi de nous appuyer sur le paradigme populaire de publication/souscription (P/S) pour fournir un service de routage basé sur le contenu. Dans cette approche, des éditeurs publient des événements et des nœuds envoient des abonnements pour déclarer les contenus qui les intéressent au système qui est alors en charge de leur faire suivre les événements répondant à leur demande.

Après un état de l'art sur les systèmes P/S existants, notamment ceux adaptés aux VANET, nous avons choisi de tester des solutions paraissant intéressantes dans un contexte AANET. Pour cela, nous avons développé sous Omnet++ un module de mobilité utilisant des reports de position réels afin de rejouer des journées complètes

de trafic d'avions réels, ainsi que plusieurs applications aéronautiques s'appuyant sur un système P/S permettant de générer des données réalistes. Les résultats montrent que ces solutions ne sont pas complètement adaptées pour un contexte AANET.

C'est pourquoi, dans un second temps, nous avons proposé un nouveau système P/S pour les AANET. Cette solution s'appuie sur une architecture recouvrante ("overlay network") construite à l'aide d'un algorithme original de regroupement à 1-saut (1-hop clusterisation) adapté aux AANET. Afin de favoriser la stabilité de l'architecture recouvrante, cet algorithme s'appuie sur le nombre de voisins et la mobilité relative entre les nœuds voisins pour définir les groupes. Les tests réalisés montrent que le système P/S s'appuyant sur cette surcouche offre de meilleurs résultats que les solutions testées précédemment, que ce soit en termes de charge réseau ou de pourcentage d'événements délivrés.

Mots-clés

Réseau ad-hoc, MANET, AANET, Algorithme de regroupement, solution de publication / souscription

Abstract

In a context of growing needs of communication means to increase flight safety and meet the expectations of companies and passengers, the world of civil aviation seeks new communication systems that can meet these objectives. The Aeronautical Ad-Hoc Networks, AANETs represent an innovative approach to address this problem. It is self-configured networks, using no fixed infrastructure where the nodes are commercial aircraft. The AANETs can be seen as a subset of the VANET (Vehicular Ad-Hoc Networks) since they share many features as the constraints imposed on the trajectories.

In order to use these mobile networks more efficiently while meeting the needs of new applications, such as the transmission of weather information in real time, requiring air to air communications. , we propose in this thesis to use the paradigm of content based routing above AANET. In this kind of routing, it is not a destination address that is used to identify the recipients, but the message content itself. In this paradigm, a transmitter sends a message having attributes and the message is then transmitted by the network to nodes interested by the content of the message. Applied to weather information update, this approach allows an aircraft detecting a dangerous phenomenon such as a thunderstorm to only prevent interested nodes, ie those whose the trajectory come close to the storm during the lifetime of the event.

In this thesis, we have chosen to rely on the popular Publish / Subscribe (P / S) paradigm to provide a content based routing service. In this approach, publishers publish events. On the other side, nodes send subscriptions to declare their interest and the system is then in charge of forward events to nodes that match their needs..

After a state of the art about existing P / S systems, particularly those adapted to VANETs, we choose to test the solutions seemed interesting in a AANET context. To accomplish this, we have developed as a Omnet ++ mobility model using real position reports to replay a full day of traffic of aircraft and several aeronautical applications based on a P / S system to generate realistic data. The results show that these solutions are not completely suitable for AANET context.

Therefore, in a second step, we proposed a new P / S system which is more efficient on a AANET. This solution is based on an overlay network built thanks to a new of 1-hopping clustering algorithm suitable for AANET. In order to increase the stability of the overlay architecture, this algorithm is based on the number of neighbors and the relative mobility between the nodes to define groups. The tests show that the P

/ S system based on this overlay provides better results than the previously tested solutions, whether in terms of network load or percentage of transmitted events.

Keywords

Ad-hoc Network, MANET, AANET, Clustering algorithm, Publish / subscribe solution

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués à l'Ecole Nationale de l'Aviation de Civile (ENAC) de Toulouse au sein du groupe de recherche ResCo (Réseaux de Communication) du laboratoire TELECOM.

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de thèse, Alain Pirovano, enseignant-chercheur à l'ENAC et responsable du groupe RESCO, et Fabien Garcia, enseignant-chercheur à l'ENAC, de m'avoir proposé de faire cette thèse lors de mon arrivée à l'ENAC. Leur encadrement scientifique et leur grande disponibilité m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

Je suis également très reconnaissant pour le temps et le travail accordés par l'ensemble des membres du jury de ma thèse : Mme Emmanuelle Anceaume , chargée de recherche au CNRS ; M. Thomas Noël, professeur à l'Université de Strasbourg ; M. Zoubir Mammeri, professeur à l'université de Toulouse ; M. Marcelo Dias De Amorim, directeur de recherche CNRS ; M. Michel Marot, professeur à Telecom SudParis 9. En particulier, je remercie M. Noël et M. Dias De Amorim d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je remercie également tous les membres du groupe ResCo : Nicolas, Slim, Antoine, Quentin, Jean-Aimé et Ons, aussi bien pour leur aide précieuse que pour les excellents moments passés ensemble.

Enfin, je remercie ma compagne, Amandine, pour son soutien pendant ces années de thèse, particulièrement sur la fin où elle m'a permis de me concentrer sur les travaux de ma thèse.

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Contexte de la thèse	3
1.1.1	Les communications aéronautiques	3
1.1.2	Les systèmes de communication sol/bord existants	5
1.1.3	Les sous-réseaux air/sol existants	8
1.1.4	Déploiement	9
1.1.5	Perspectives	9
1.1.6	Émergence des communications air/air	11
1.2	Les réseaux ad hoc aéronautiques	11
1.2.1	Les réseaux ad hoc mobiles	12
1.2.2	AANET : définition et faisabilité	12
1.2.3	AANET et VANET	13
1.3	Problématique de la thèse	15
1.4	Organisation du mémoire	16
2	Routage basé sur le contenu : définition et état de l’art	17
2.1	Routage basé sur le contenu : du concept au modèle publication/souscription	18
2.2	Modèle Publication/Souscription	19
2.2.1	Définition	19
2.2.2	Caractérisation d’une architecture Publication / Souscription	20
2.3	Etat de l’art sur les systèmes de Publication / Souscription basés sur le contenu	22
2.3.1	Les algorithmes de correspondance entre les événements et les abonnements	23
2.3.2	Les algorithmes de diffusion des événements dans le réseau	26
2.4	Adaptation du modèle P/S au AANET	33
2.4.1	Problématique	33
2.4.2	Etat de l’art	34
2.5	Conclusion	39

3	Etude de solutions P/S dans un contexte AANET	40
3.1	Méthodologie	41
3.1.1	Approche par simulation	41
3.1.2	Architecture des nœuds	42
3.2	Modélisation du contexte AANET	44
3.2.1	Le module de mobilité	44
3.2.2	Les applications utilisant le système P/S	47
3.3	Modélisation des systèmes P/S	54
3.3.1	Solution basée sur le routage géographique	54
3.3.2	Solution basée sur le routage de proximité	57
3.4	Etude de performance dans un contexte AANET	57
3.4.1	Les paramètres constants	57
3.4.2	Les indicateurs	58
3.4.3	Informations complémentaires sur le contexte AANET	59
3.4.4	Etude de l'heuristique simple	60
3.4.5	Etude de la solution basée sur du routage de proximité	61
3.4.6	Etude de la solution basée sur du routage géographique	62
3.4.7	Synthèse	66
3.5	Conclusion	67
4	Proposition d'un système P/S adapté aux AANETs	68
4.1	Présentation de la solution proposée	69
4.1.1	Algorithme de regroupement des nœuds	69
4.1.2	Le système P/S	71
4.2	Définition d'un nouvel algorithme de regroupement	72
4.2.1	Etat de l'art	72
4.2.2	Proposition d'un nouveau algorithme : CAPS	78
4.2.3	Etude de CAPS	82
4.2.4	Synthèse	88
4.3	Etude du nouveau système P/S	88
4.3.1	Principes de fonctionnement du système P/S	89
4.3.2	Implémentation sous Omnet++	92
4.3.3	Etude des performances	93
4.3.4	Les paramètres constants	93
4.4	Conclusion	98
5	Conclusion	99
5.1	Contributions de la thèse	100
5.1.1	Modélisation d'un contexte AANET sous Omnet++	100
5.1.2	Etude de systèmes P/S existants dans un contexte AANET	101

5.1.3	Développement d'un algorithme de regroupement adapté aux AANET	101
5.1.4	Développement d'un système P/S adapté aux AANET	103
5.2	Perspectives	103
5.2.1	Modélisation réalistes des couches basses	104
5.2.2	Utilisation d'un routage géographique	104
5.2.3	Etude du système P/S dans les VANET	105
5.2.4	Le module de mobilité	105

A Liste des acronymes

Liste des figures

1.1	Les classes de communications sol bord	5
1.2	La pile protocolaire de l'ATN	7
1.3	Exemple d'architecture pour un AANET	13
1.4	AeRAN - Connectivité en espaces aériens océanique atlantique nord . .	14
1.5	AeRAN - Connectivité en espaces aériens océanique atlantique nord . .	14
1.6	Exemple de communication traitée : annonce d'un phénomène météo .	16
2.1	Principe d'une communication basée sur le modèle Publication/Souscription	19
2.2	Principe d'un système P/S basé sur une architecture centralisée	21
2.3	Principe d'un système P/S basé sur une architecture distribuée	22
2.4	Exemple de représentation des abonnements avec PST	25
2.5	Principe des solutions basées sur une mise en correspondance centralisée	27
2.6	Principe des solutions basées sur l'apprentissage par le chemin inverse .	29
2.7	Principe des solutions basées sur l'utilisation d'un DHT	31
2.8	Création d'arbres logiques avec DPS	32
2.9	Principe des solutions basées sur du routage géographique	36
2.10	Principe des solutions basées sur du routage de proximité	37
3.1	Architecture protocolaire	42
3.2	Exemple de NAT	45
3.3	Exemple de fichier XML généré pour le modèle de mobilité	47
3.4	Utilisation du module de mobilité pour le placement des nœuds sur une grille	48
3.5	Utilisation du module de mobilité pour la journée du 29 novembre 2014	48
3.6	Illustration du concept de "Wind Networking" dans un cas simple	50
3.7	LBM : concept de zone géographique visée et zone d'acheminement . .	55
3.8	LBM : utilisation d'un cône comme zone d'acheminement	56
3.9	Nombre d'avions en vol	60
3.10	Solution basée sur un routage de proximité : résultats pour la journée du 25 déc 2012	62
3.11	Solution basée sur un routage de proximité : résultats pour la journée du 28 juin 2013	63

3.12	Solution basée sur un routage géographique : résultats avec la stratégie utilisant la distance par rapport à la zone visée (25/12/2012)	64
3.13	Solution basée sur un routage géographique : résultats avec la stratégie utilisant un cône comme zone d’acheminement (25/12/2012)	64
3.14	Solution basée sur un routage géographique : résultats avec la stratégie utilisant la distance par rapport à la zone visée (28/06/2013)	65
3.15	Solution basée sur un routage géographique : résultats avec la stratégie utilisant un cône comme zone d’acheminement (28/06/2013)	65
4.1	Illustration des différents rôles dans un groupe	70
4.2	Principe du système P/S dans le cas de la diffusion des abonnements .	72
4.3	Exemple de formation de groupes avec LIC	74
4.4	Exemple de formation de groupes avec HCC	74
4.5	Calcul de coefficient D_{coef} (avec $N_{L_{thresh}} = 10$ et $N_{H_{thresh}} = 15$)	80
4.6	Machine à état de l’algorithme CAPS	81
4.7	Exemple de scénario simple utilisé pour valider CAPS	83
4.8	performances de CAPS suivant le paramètre $N_{L_{thresh}}$ pour la journée du 25 décembre 2012	84
4.9	performances de CAPS suivant le paramètre $N_{L_{thresh}}$ pour la journée du 28 juin 2013	84
4.10	performances de CAPS suivant le seuil α pour la journée du 25 décembre 2012	85
4.11	performances de CAPS suivant le seuil α pour la journée du 28 juin 2013	85
4.12	Comparaison des algorithmes de regroupement pour la journée du 25/12/2012	87
4.13	Comparaison des algorithmes de regroupement pour la journée du 28/06/2013	87
4.14	Illustration de l’algorithme de regroupement CAPS pour la journée du 25/12/2012	88
4.15	Principe de l’approche orientée événement pour le système P/S	90
4.16	Principe de l’approche orientée abonnement pour le système P/S	90
4.17	Principe de la synchronisation entre responsables de groupe	92
4.18	Influence de la périodicité des messages SYNC (journée du 25/12/2012)	94
4.19	Influence de la périodicité des messages SYNC (journée du 28/06/2013)	95
4.20	Influence du TTL utilisé pour les messages SYNC (journée du 25/12/2012)	95
4.21	Influence du TTL utilisé pour les messages SYNC (journée du 28/06/2013)	96

Liste des tableaux

1.1	Systèmes de communication utilisés suivant les zones géographiques et le type trafic	9
1.2	Comparaison des caractéristiques des VANET / AANET	14
3.1	Classification des applications pouvant s'appuyer sur un service P/S . .	51
3.2	Paramètres communs à toutes les simulations	58
3.3	Nombre d'abonnements et d'événements générés durant une simulation	60
3.4	Résultats obtenus pour l'heuristique simple	60
3.5	Résultats obtenus pour une retransmission des événements toutes les 60s	61
3.6	Résultats obtenus pour une retransmission des événements toutes les 60s	66
3.7	Résultats obtenus avec uniquement l'application météo pour la journée du 25/12/2012	66
3.8	Résultats obtenus avec uniquement l'application météo pour la journée du 28/06/2013	67
4.1	Paramètres communs à toutes les simulations pour CAPS	83
4.2	Résultats des algorithmes de regroupement pour la journée du 28 juin 2013	88
4.3	Paramètres communs à toutes les simulations	93
4.4	Résultats suivant la stratégie de diffusion utilisée pour la journée du 25 décembre 2012	96
4.5	Résultats suivant la stratégie de diffusion utilisée pour la journée du 28 juin 2013	96
4.6	Résultats des solutions P/S pour la journée du 25 décembre 2012 . . .	97
4.7	Résultats des solutions P/S pour la journée du 28 juin 2013	97

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Contexte de la thèse	3
1.1.1	Les communications aéronautiques	3
1.1.2	Les systèmes de communication sol/bord existants	5
1.1.3	Les sous-réseaux air/sol existants	8
1.1.4	Déploiement	9
1.1.5	Perspectives	9
1.1.6	Émergence des communications air/air	11
1.2	Les réseaux ad hoc aéronautiques	11
1.2.1	Les réseaux ad hoc mobiles	12
1.2.2	AANET : définition et faisabilité	12
1.2.3	AANET et VANET	13
1.3	Problématique de la thèse	15
1.4	Organisation du mémoire	16

Les travaux réalisés lors de cette thèse sont concentrés sur la définition, la modélisation et la validation d'une architecture permettant de mettre en œuvre du routage basé sur le contenu dans les réseaux ad hoc aéronautiques. Pour comprendre et mettre en perspective ces travaux, il est important de connaître le contexte opérationnel et technique les entourant ainsi que la problématique traitée au travers de cette thèse. C'est l'objectif de ce chapitre d'introduction. La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du contexte de la thèse, et plus particulièrement des communications aéronautiques et des systèmes permettant leur mise en œuvre. Ensuite, le concept innovant de réseau ad hoc aéronautique est détaillé, avec une présentation des premiers résultats obtenus sur le sujet. La troisième partie introduit la problématique traitée dans le cadre de cette thèse au travers d'un exemple concret. Enfin, ce chapitre se conclut avec une présentation de l'organisation du mémoire.

1.1 Contexte de la thèse

Cette section présente le domaine des communications aéronautiques. Après un premier paragraphe donnant des notions et définitions utiles pour la lecture de ce chapitre, les architectures de communication sol/bord sont présentées. Ensuite, une attention plus particulière est donnée aux sous-réseaux air/sol existants et futurs. Enfin, la dernière partie de cette section introduit l'émergence des besoins de communications entre avions.

1.1.1 Les communications aéronautiques

Les communications aéronautiques regroupent les échanges vers ou depuis un avion. Aujourd'hui, l'interlocuteur se situe généralement au sol (comme par exemple le contrôleur aérien ou le centre des opérations d'une compagnie aérienne) mais, dans un futur proche, des communications entre avions sont envisagées pour répondre aux besoins de nouvelles applications. Ces communications sont de deux types : vocales ou de données.

1.1.1.1 Les échanges vocaux

Les échanges vocaux représentent encore aujourd'hui la majorité des communications entre le sol et le bord. Comme exemple, nous pouvons citer les clairances envoyées par les contrôleurs aériens aux pilotes afin d'assurer la séparation des avions dans l'espace aérien et ainsi leur sécurité. Ces échanges vocaux se font majoritairement au travers de liaisons radio sur la bande Very High Frequency (VHF) aéronautique (actuellement de 117.975 MHz à 137 MHz). Cette bande passante est aujourd'hui découpée en 2280 canaux espacés chacun de 8,33 kHz. Dans les zones où les portées offertes par la radio VHF ne sont pas suffisantes (comme au-dessus des océans), les communications

vocales sont transmises soit par radio High Frequency (HF) (de 3 MHz à 30 MHz), soit par SATellite COMmunication (SATCOM).

1.1.1.2 Les échanges de données

Les échanges de données numériques, également appelés communications *datalink* (c'est ce terme qui est utilisé dans la suite de ce mémoire), sont apparus à la fin des années 70 et n'ont cessé depuis de prendre une proportion de plus en plus importante dans les échanges sol/bord. Ce sont les compagnies aériennes qui ont été les premiers acteurs à prendre conscience de l'intérêt des communications datalink en introduisant le premier système d'échange de données sol/bord, connu sous le nom de Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS). Ce système également appelé Plain Old Acars (POA) (en référence à la première version du système qui a évolué depuis) offre un débit de 2,4 kbps grâce à l'utilisation de canaux VHF de 25 kHz sur la bande passante réservée aux communications vocales. La première application utilisée au dessus de ce système a été Out, Off, On, In (OOOI). Elle a pour but de mieux gérer le temps de travail des pilotes en envoyant à la compagnie l'heure exacte à laquelle l'avion quitte la porte (Out), décolle (Off), atterrit (On) puis revient à la porte (In).

Bien qu'initialement utilisés par les compagnies aériennes, ces échanges datalink se sont diversifiés et font maintenant l'objet d'une classification en quatre catégories par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (fig. 1.1).

- **Air Traffic Services Communication (ATSC)**, cette catégorie regroupe les communications entre les pilotes et les services de contrôle aérien. Ces communications servent à la sécurité et à l'efficacité du vol et sont donc critiques.
- **Aeronautical Operation Control (AOC)**, cette catégorie regroupe l'ensemble des "communications nécessaires à l'exercice de l'autorité sur le commencement, la continuation, le déroutement ou l'achèvement du vol pour des raisons de sécurité, de régularité ou d'efficacité". Comme la description le laisse imaginer, il s'agit également de communications critiques. Les applications possibles sont la transmission des horaires de décollage et atterrissage, la transmission du niveau de carburant, d'information du vol, des plans de vols révisés,...
- **Aeronautical Administrative Control (AAC)**, désignant les communications entre les pilotes et les compagnies qui ne sont pas liées à la sûreté des vols. Il s'agit par exemple de l'envoi d'informations concernant le personnel navigant, de liste de passager en correspondance...
- **Aeronautical Passenger Communication (APC)**, regroupant l'ensemble des services offerts aux passagers. Le premier qui vient à l'esprit est l'accès à internet. Bien que non critique pour la sécurité des vols, cette catégorie intéresse fortement

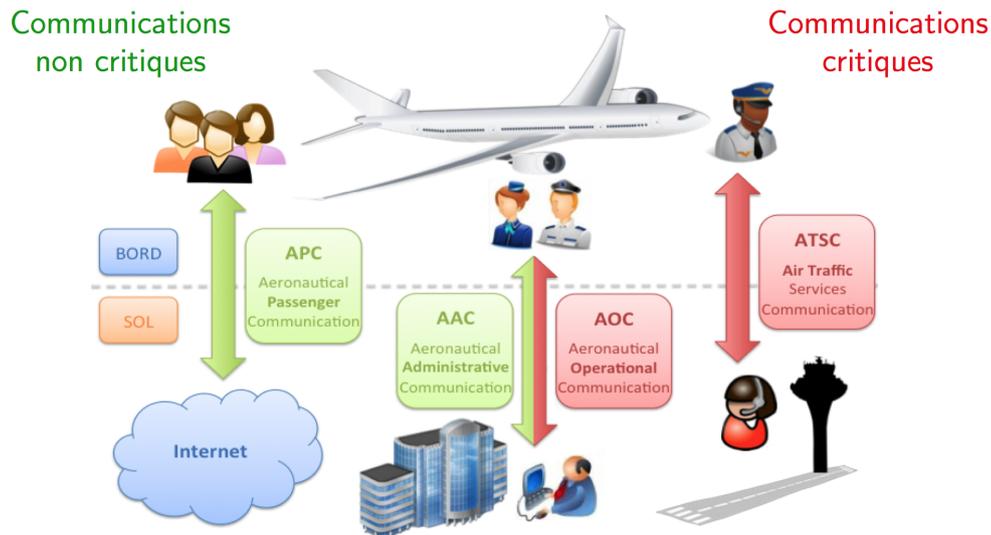


FIGURE 1.1 – Les classes de communications sol bord

les compagnies aériennes qui y voient la possibilité de se démarquer et fait donc l'objet de beaucoup de travaux de recherche.

La multiplication des besoins d'échanges de données entre le sol et le bord a eu pour conséquence la nécessité de trouver des alternatives au POA et à son débit très faible. Elles sont présentées dans la section suivante.

1.1.2 Les systèmes de communication sol/bord existants

Dans cette partie, nous nous limiterons aux systèmes utilisés pour les communications critiques (ATSC et AOC) puisque ce sont essentiellement les services associés à ces communications qui nous ont intéressés durant cette thèse. Trois systèmes existent à l'heure actuelle :

- l'ACARS, introduit précédemment ;
- le Future Air Navigation System (FANS) 1/A, complément à l'ACARS permettant son utilisation pour les communications ATSC dans les espaces aériens non denses ;
- l'Aeronautical Telecommunication Network (ATN), solution spécifiée et mise en avant par l'OACI pour répondre à tous les besoins de communications sol/bord, que ce soit pour le contrôle aérien, les compagnies ou les passagers.

Ces solutions sont détaillées dans la suite de cette section.

1.1.2.1 ACARS

Introduit dans le paragraphe 1.1.1.2, l'ACARS fut le premier système de communication sol/bord utilisé par les compagnies aérienne. A l'origine, le terme ACARS

englobe tous le système, c'est à dire le sous-réseau air/sol, les équipements embarqués dans l'avion et les applications utilisées (comme OOOI). Ici, afin de faciliter la compréhension du lecteur, nous réduisons le périmètre du terme ACARS au réseau fournissant un service de communication sol/bord en s'appuyant sur des sous-réseaux air/sol (détaillés dans la section 1.1.3).

Techniquement, l'ACARS s'appuie sur les principes suivant :

- un service orienté caractère ;
- un service non connecté et sans acquittement n'offrant aucune garantie aux applications ;
- un acheminement des messages basé sur un serveur central au sol ;
- des délais très importants pour l'acheminement des messages ;

Tous ces principes font que l'ACARS est un système qui n'offre aucune qualité de service aux applications. Ce choix est justifié par les exigences des compagnies (à l'origine du système) qui ont privilégié à l'époque les aspects coût par rapport à la performance du réseau.

1.1.2.2 FANS 1/A

Au début des années 80, avec l'apparition des premières communications datalink, un comité dédié aux futurs systèmes de navigation aérienne a été créé à l'OACI, le FANS. Ce comité a alors introduit le concept CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance / Air traffic Management) dont l'objectif est d'améliorer la capacité et l'efficacité du transport aérien, tout en garantissant la meilleure sûreté possible. Au niveau des communications sol/bord, le comité FANS a décliné ce concept sur deux axes. Le premier axe a consisté en la définition de plusieurs applications s'appuyant sur la liaison datalink introduite avec l'ACARS. Un exemple est Controller Pilot Data Link Communication (CPDLC) qui permet l'échange de messages formatés entre le pilote et le contrôleur, remplaçant les communications vocales traditionnellement utilisées pour échanger des clairances. Toutes les applications standardisées dans le cadre de ce concept requièrent de la part du réseau un service orienté bit et une qualité de service que l'ACARS ne peut pas fournir. Pour combler ce manque, le comité FANS a travaillé sur un second axe et défini une surcouche à l'ACARS offrant les fonctionnalités suivantes :

- la mise en place d'une connexion de bout en bout avec l'acquittement des données et la détection des erreurs permettant d'offrir un service fiable aux applications ;
- la conversion bit/caractère, l'ACARS offrant un service orienté caractère ;
- la mise en œuvre d'un adressage pour les nœuds au sol permettant aux avions l'envoi de message aux services de contrôle aérien (l'ACARS permet uniquement à un avion de communiquer avec sa compagnie).

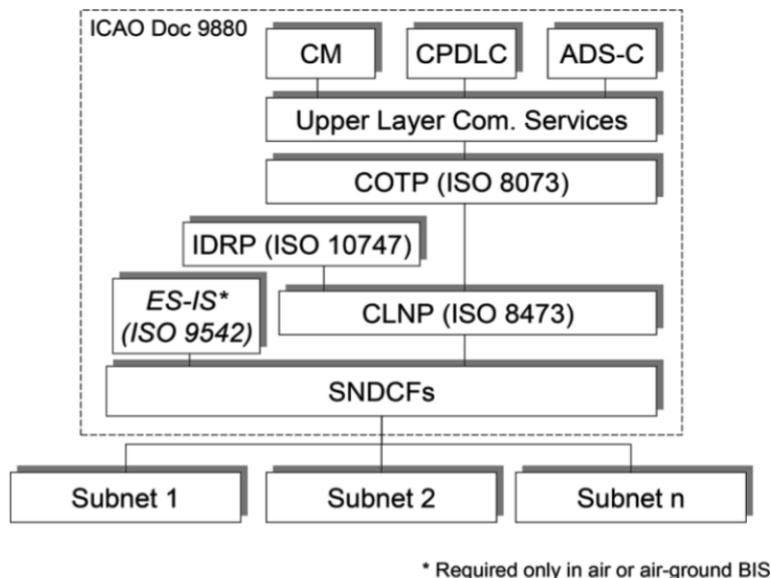


FIGURE 1.2 – La pile protocolaire de l’ATN

Les fonctionnalités et les applications décrites ci-dessus sont standardisées dans un document (ARINC 622) et connu sous le nom de FANS 1/A.

1.1.2.3 ATN

En parallèle du déploiement du Future Air Navigation System 1/A (FANS 1/A), l’OACI a commencé à travailler sur un réseau aéronautique ab initio : l’ATN. L’objectif était de créer une architecture réseau (couvrant du niveau 3 au niveau 7 du modèle OSI, c’est à dire comprenant également un ensemble de protocoles applicatifs) permettant de répondre à tous les besoins de communications entre le sol et le bord, allant des communications ATSC aux communications des passagers (APC). La solution retenue est la définition d’une architecture globale d’interconnexion s’appuyant sur des protocoles standardisés par l’Open Systems Interconnection (OSI). La figure 1.2 issue de la documentation OACI détaille la liste des protocoles retenus. Au niveau applicatif, on retrouve des applications définies pour le FANS 1/A. Néanmoins, bien qu’offrant les mêmes services, elles ne sont pas inter-opérables. De plus de nouvelles applications sont apparues avec l’ATN et sont regroupées sous l’appellation FANS 2/B. Toutes ces applications s’appuient sur les protocoles Connection Oriented Transport Protocol (COTP) au niveau transport et Connection Less Network Protocol (CLNP) au niveau réseau, respectivement définis dans les standards ISO/IEC 8073 et ISO 8473.

De plus, depuis le début des années 2010, l’OACI a fait évoluer l’ATN pour qu’il puisse fonctionner au dessus du protocole Internet Protocol (IP). Cette évolution est appelée ATN/IPS (pour ATN using Internet protocol Suite) et est définie dans le document 9896 de l’OACI. L’objectif était de se rapprocher des standards de l’Internet afin de faciliter le développement d’un système ATN. Néanmoins, les compagnies n’envi-

sagent pas d'utiliser cette version à court terme car les coûts pour certifier un nouveau système de communication sont bien plus importants que le gain apporté par cette nouvelle version.

1.1.3 Les sous-réseaux air/sol existants

Le point commun entre tous les systèmes décrits précédemment est la nécessité de s'appuyer sur un sous-réseau air/sol permettant de transmettre les données entre le bord et le sol. Actuellement, trois sous-réseaux existent : la VHF Data Link (VDL) mode 2, la HF Data Link (HFDL) et la SATCOM.

1.1.3.1 VDL mode 2

La VDL mode 2 est le principal système déployé sur les zones continentales (notamment en Europe de l'ouest). Ce sous-réseau s'appuie sur des stations au sol émettant dans un rayon de 200 km sur la bande VHF et capables de prendre en charge jusqu'à 200 avions. Elle a été spécifiée par l'OACI en 1997 et prévue initialement comme sous-réseau support à l'ATN. Dû au manque d'intérêt des compagnies aériennes et des services de contrôle pour l'ATN, ce sous-réseau peut également être utilisé pour l'ACARS. Nous parlons alors de ACARS Over AVLC (AOA), en opposition au POA qui correspond à l'utilisation de la VHF analogique pour transmettre les données.

Au niveau de la couche liaison, la VDL mode 2 implémente le protocole Aviation VHF Link Control (AVLC), qui est une adaptation du protocole High-level Data Link Control (HDLC), au dessus d'une sous-couche Medium Access Layer (MAC) basée sur du Carrier Sense Media Access (CSMA) p-persistent. Au niveau physique, une modulation de phase Differentially encoded 8-phase Shift Keying (D8PSK) est utilisée offrant un débit binaire de 31,5 kbits/s.

1.1.3.2 HFDL

La portée des stations VDL mode 2 étant limitée à 200 km, ce système ne peut pas être utilisé partout, notamment au dessus des océans. La technologie HFDL peut alors être utilisée en complément pour couvrir les zones océaniques et polaires. La caractéristique principale des transmissions HF est de pouvoir établir des communications au delà de la ligne de vue grâce aux réflexions successives entre le sol ou la mer et la ionosphère. Cela permet aux stations HFDL d'avoir des portées bien plus importantes que la VDL mode 2. Aujourd'hui, 17 stations sol sont déployées tout autour de la planète pour assurer une couverture mondiale. La HFDL utilise trois types de modulation de phase : BPSK, QPSK et 8PSK. Le débit symbole offert étant de 1800 symboles par seconde, quatre débits binaires sont disponibles suivant la modulation de phase utilisée : 1800 bits/s (8PSK), 1200 bits/s (QPSK), 600 bits/s et 300 bits/s (BPSK). Le choix de

Zone	Océanique		Continentale	
Type de communication	ATSC	AOC	ATSC	AOC
Systèmes de communication	FANS 1/A	ACARS	ATN	ACARS
Sous-réseau air/sol	VDL, SATCOM	VDL, SATCOM, HF DL	VDL	VDL, SATCOM, HF DL

TABLEAU 1.1 – Systèmes de communication utilisés suivant les zones géographiques et le type trafic

la modulation utilisée est fait sur la base du rapport signal à bruit reçu. Au niveau de la couche d'accès, la HF DL s'appuie sur du Time Division Multiple Access (TDMA) avec des trames de 32 secondes découpées en 13 intervalles de temps.

Avec ces caractéristiques, la HF DL n'offre pas de bonnes performances, que ce soit en terme de capacité disponible ou de délai d'acheminement des messages (supérieure à la minute).

1.1.3.3 SATCOM

Les liaisons satellites sont une alternative aux liens HF et VHF comme moyen de communication air/sol. Elles ont l'avantage d'assurer une très grande couverture, dans le cas des satellites géostationnaires ou de constellations de satellites en orbite basse. Pour les communications aéronautiques critiques (comme l'ATSC par exemple), deux systèmes opérant en bande L (1 à 2 GHz) ont été approuvés par l'OACI. Le premier s'appuie sur le service *Classic-Aero* offert par Immarsat et reposant sur une constellation de satellites géostationnaires. Ce service se décline en plusieurs sous-services offrant des débits allant de 1,2 kbits/s à 10,5 kbits/s. Le second, approuvé très récemment (2012), s'appuie sur une constellation de 66 satellites en orbite basse opérés par Iridium. Il offre l'avantage d'assurer une couverture mondiale, y compris en zone polaire (contrairement aux satellites géostationnaires). Cependant, la capacité offerte est limitée à 2,4 kbit/s.

1.1.4 Déploiement

Les deux sections précédentes ont présentées plusieurs systèmes de communications sol/bord, pouvant s'appuyer sur différents sous-réseaux air/sol. Afin de comprendre les combinaisons possibles suivant la zone géographique et la criticité du trafic transmis, le tableau 1.1 résume les architectures possibles.

1.1.5 Perspectives

La section 1.1.3 a montré que les moyens de communication air/sol actuels offrent des débits limités à quelques dizaines de kbits/s dans le meilleur des cas. Or, dans le cadre des grands programmes de recherche et développement actuellement en cours en Europe (SESAR) et en Amérique du nord (NextGen), des nouveaux besoins de

communication apparaissent entre le sol et le bord ou entre avions. Pour satisfaire ces besoins, des nouveaux moyens de communications sont en cours d'études et de normalisation dans le cadre de ces projets. Ils sont présentées dans la suite de cette section.

1.1.5.1 AeroMACS

L'AeroMACS [EPG11] est une nouvelle technologie dédiée aux communications aéronautiques. C'est une évolution du standard IEEE 802.16e, plus communément appelé WiMAX. Cette technologie a été pensée pour offrir un moyen de communication sécurisé et fiable lorsque les avions sont au sol dans l'enceinte des aéroports (on parle de communications Gatelink). Elle permet d'établir des communications entre des nœuds mobiles (comme les avions ou les véhicules au sol) et les personnels des compagnies aériennes ou de l'aéroport. Le choix de s'appuyer sur le WiMAX a permis de profiter des études et des tests effectués depuis plusieurs années sur cette technologie. Ainsi le développement et la validation d'équipement permettant de mettre en œuvre un réseau AeroMACS ont déjà débuté comme le montre l'article [AM15].

1.1.5.2 L-DACS

L-band Digital Aeronautical Communication System (L-DACS) [SESS14] est un nouveau système de communication directe pour les zones continentales visant à remplacer la VDL mode 2 à terme. Deux versions sont candidates pour ce système : L-DACS1 et L-DACS2. Elles ont comme points communs de travailler en bande L et d'offrir une capacité d'environ 200 kbits/s. L-DACS1 s'appuie sur une modulation de type Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), comme pour les normes relatives au WiFi ou au WiMAX. L-DACS2 utilise une modulation de type Continuous Phase Frequency Shift Keying (CPFSK) issue de la technologie Global System for Mobile Communications (GSM). A l'heure actuelle, ces deux solutions sont encore en concurrence pour le choix du système cible retenu. La décision finale sera prise sur la base de tests réalisés sur des prototypes en cours de développement.

1.1.5.3 Evolutions des communications satellites

Comme pour les systèmes s'appuyant sur des infrastructures au sol, des études visant à définir une solution par satellite plus performante sont en cours. Elles se déroulent dans le cadre du programme IRIS piloté par l'European Space Agency (ESA). Deux pistes principales sont étudiées dans ce programme.

- La première, étudiée dans le cadre du projet THAUMAS, est une amélioration du service offert par Immarsat. Elle utilise la technologie SwiftBroadband introduite par la compagnie et permettant d'offrir des débits d'environ 400 kbits/s.

- La seconde est étudiée dans le projet ANTARES. Le système envisagé s'appuie sur les nombreuses années d'expérience dans les communications et notamment plusieurs principes récents tel que l'Adaptative Coding and Modulation (ACM) ou le Generic Stream Encapsulation (GSE).

1.1.6 Émergence des communications air/air

Tous les systèmes existants ou futurs décrits dans cette partie sont pensés pour les communications sol/bord. Ce choix est justifié par les besoins actuels. Néanmoins, depuis quelques années, de nouvelles applications aéronautiques nécessitant des communications air/air (c'est à dire entre avions) émergent. Un exemple est l'Automatic Dependant Surveillance - Broadcast (ADS-B) dont le principe est simple. Les avions, connaissant leur position grâce des équipements embarqués (récepteur GPS et centrale à inertie), envoient périodiquement un message contenant cette position, le plus souvent sur la fréquence 1090 MHz. Ainsi, tous les systèmes disposant d'un récepteur ADS-B sont capables de connaître la position des avions voisins. Initialement, cette application a été définie comme une alternative moins coûteuse aux systèmes radar et par conséquent comme une application bord/sol. Mais, dans le cadre des programmes SESAR et NextGen, l'utilisation de l'ADS-B a été étendue comme une application air/air (concept d'ADS-B in) ce qui permet à un avion de connaître la position des avions autour de lui. L'objectif est de donner à un pilote une vision de son environnement proche.

De plus, en y regardant de plus près, nous remarquons que les communications vocales représentant aujourd'hui la majorité des communications utilisées par un pilote constituent des communications de type air/sol mais également air/air puisqu'un pilote entend les communications émises par les autres pilotes sur la fréquence radio. L'intérêt est d'avoir une meilleure connaissance de son environnement.

Nous pensons que ces nouveaux besoins de communications de données air/air vont s'accroître. C'est pourquoi les travaux poursuivis lors de cette thèse s'inscrivent dans ce contexte.

1.2 Les réseaux ad hoc aéronautiques

Tous les moyens de communication présentés dans la section précédente s'appuient soit sur des stations au sol nécessitant que les avions soient en portée directe (et par conséquent limitant la portée à environ 200 km), soit sur des satellites. Les communications HF sont particulières dans le sens où bien qu'elles permettent de longues portées, les performances offertes en termes de débit et de latence sont trop faibles pour la plupart des applications.

- Les solutions basées sur des stations sols (VDL mode 2 ou L-DACS) ont l'inconvénient de nécessiter le déploiement d'une infrastructure au sol lourde et par conséquent coûteuse.
- Les solutions s'appuyant sur des satellites posent des problèmes pour l'intégration des antennes au niveau des avions.

Une approche innovante pour offrir un nouveau moyen de communication est la création d'un réseau ad hoc mobile dont les nœuds sont les avions en vol. Ce type de réseau est appelé Aeronautical Ad-Hoc Network (AANET) ou en français *réseau ad hoc aéronautique*. Afin de bien comprendre ce concept, cette section introduit tout d'abord les réseaux ad hoc mobiles (Mobile Ad-Hoc Network (MANET)), concept plus général englobant notamment les AANETs. Ensuite nous présentons les caractéristiques et les études de faisabilité qui ont déjà été réalisées sur les AANET. Enfin un parallèle est fait avec une autre catégorie de MANET, les Vehicular Ad-Hoc Network (VANET) qui font l'objet de nombreux travaux pouvant potentiellement être transposés aux réseaux ad hoc aéronautiques.

1.2.1 Les réseaux ad hoc mobiles

Les réseaux ad hoc sont des réseaux sans fil ne comprenant aucune infrastructure. Ils sont dits mobiles (nous parlons alors de MANET) lorsque les nœuds se déplacent impliquant une topologie dynamique. Dans ce type de réseaux, chaque nœud est à la fois potentiellement source ou destinataire des messages mais également relais afin d'acheminer les informations de proche en proche jusqu'au destinataire. L'intérêt des MANET est multiple. L'absence d'infrastructure permet notamment de réduire les coûts ou de mettre en place des communications dans des environnements difficiles d'accès.

Ce type de réseau a fait l'objet de nombreuses études, de part les applications possibles ainsi que pour ces particularités, comme la dynamique de la topologie. Toutes ces contraintes ont notamment encouragé la communauté scientifique à proposer de nombreux protocoles de routage prenant en compte les caractéristiques des MANET, comme par exemple [CJ03] ou [PBRD03].

1.2.2 AANET : définition et faisabilité

Comme indiqué dans l'introduction de cette section, les AANETs sont des MANETs où les nœuds sont des avions commerciaux. Ils ont été proposés pour la première fois dans [SJK06] en 2006. L'objectif visé était de fournir un nouveau moyen de communication sol/bord afin d'offrir un moyen de communication de données complémentaire, en permettant d'acheminer les données de proche en proche jusqu'à un avion en portée directe d'une station au sol, comme illustrée par la figure 1.3. Néanmoins, cette



FIGURE 1.3 – Exemple d’architecture pour un AANET

approche permet également des communications entre les avions et c’est dans ce cadre qu’ils sont utilisés dans cette thèse.

La faisabilité des AANET a fait l’objet d’une thèse entre 2009 et 2012, [Bes12]. Sur la base des mouvements réels des avions commerciaux, elle a permis d’étudier, grâce notamment au logiciel AeRAN (pour AeRonautical Ad hoc Networks) développé pour la thèse, la connectivité du réseau ad hoc pour une portée de communication donnée (c’est à dire le pourcentage d’avions connectés directement ou indirectement à une station sol) suivant la zone géographique considérée (océanique ou continentale). Les résultats obtenus sont présentés à la figure 1.4 pour l’espace au dessus de l’atlantique nord et 1.5 pour l’espace au dessus de la France. Ces deux figures s’appuient sur des données issues de [Bes12].

Ces résultats démontrent qu’avec une portée suffisante (soit 150 km au dessus de la France et 350 km au dessus de l’atlantique nord) la connectivité du réseau est très satisfaisante. En effet, avec ces portées, une connectivité pour 90% des avions sur la journée est garantie.

1.2.3 AANET et VANET

Les VANET sont des réseaux ad hoc mobiles dont les nœuds sont des véhicules. Bien que ce terme semble générique, tous les travaux réalisés sur ce type de réseaux assimilent "véhicule" à véhicule routier. Or, la définition des AANET donnée dans le paragraphe précédent montre que des similitudes avec les VANETs peuvent exister. Un des premiers travaux conduit dans cette thèse a donc été de recenser ces ressemblances en réalisant une étude bibliographique. Le tableau 1.2 synthétise les résultats obtenus.

Nous remarquons que de nombreuses caractéristiques sont partagées entre les VANET et AANET, comme la probabilité importante de partitionnement ou le mouvement prévisible des nœuds (les avions sont contraints de voler dans des couloirs aériens, sur le même principe que les routes pour les voitures). Cette similarité permet de regar-

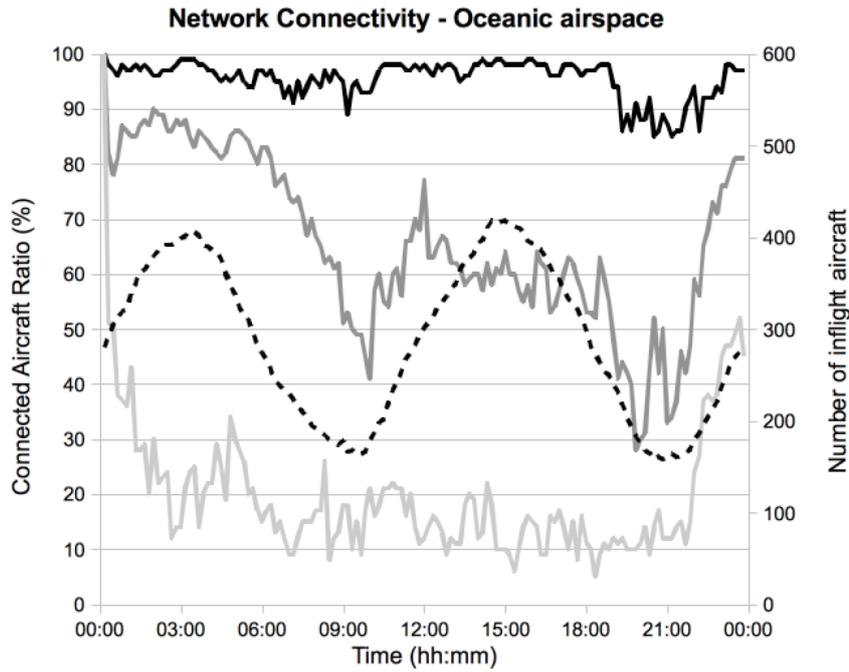


FIGURE 1.4 – AeRAN - Connectivité en espaces aériens océanique atlantique nord

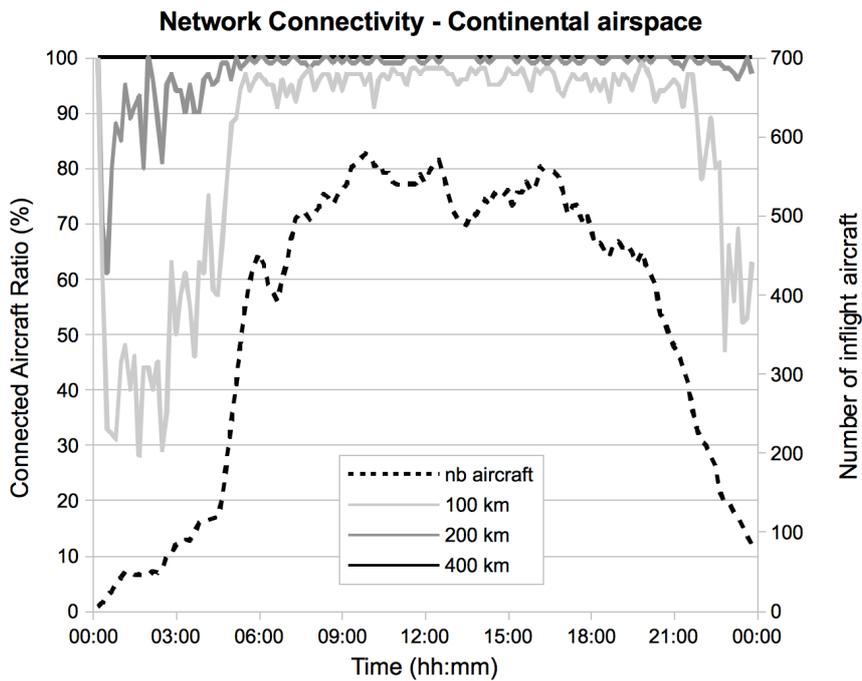


FIGURE 1.5 – AeRAN - Connectivité en espaces aériens océanique atlantique nord

Caractéristiques des VANET	Référence(s)	Pertinent pour les AANET
Nœud très mobile	[TML08], [BEH03], [XL08], [LW07], [HFB09]	Oui
Probabilité importante de partitionnement	[TML08], [BEH03], [LW07]	Oui
Mouvement des nœuds prévisibles	[TML08], [XL08], [LW07], [HFB09]	Oui
Réseau à grande échelle	[TML08]	Oui
Vitesse contrainte par le trafic et les limitations de vitesse	[XL08]	Non
Risque de congestion du canal de communication dû à une densité importante de nœuds	[HL08]	Oui
Aucune restriction d'énergie	[XL08], [LW07]	Oui

TABLEAU 1.2 – Comparaison des caractéristiques des VANET / AANET

der du coté des travaux menés sur les VANET pour les transposer sur les AANET dans la mesure du possible. Cette possibilité a été utilisée durant cette thèse, notamment pour l'état de l'art.

1.3 Problématique de la thèse

La faisabilité et la pertinence des AANET ayant déjà été étudiées et démontrées, il est important maintenant d'optimiser l'utilisation qui peut être faite de ce nouveau moyen de communication, notamment vis à vis :

- des nouvelles applications, et par conséquent des nouveaux besoins de communication, qui sont en train d'apparaître, notamment dans les programmes SESAR et NextGen ;
- des ressources limitées qui sont disponibles sur les AANET (de l'ordre de 1 Mbits/s).

C'est dans cet objectif que se placent les travaux conduits durant cette thèse. Plus précisément, nous avons travaillé sur les communications point à multipoint qui peuvent être très consommatrices en capacité du réseau. Afin de bien comprendre la problématique traitée, un exemple est introduit : l'annonce d'un phénomène météo.

En aéronautique, certains phénomènes météo peuvent être dangereux pour les avions, comme les orages. Un besoin, difficilement réalisable avec les moyens de communications actuels, est de prévenir les avions d'un événement dangereux sur leur trajectoire dès son apparition afin qu'ils puissent le contourner. Une piste intéressante pour répondre à ce besoin est illustrée par la figure 1.6. Par exemple un avion détectant un orage grâce à son radar météo pourrait l'annoncer aux avions dont la trajectoire doit passer aux abords de ce phénomène afin qu'ils puissent adapter leur route. La mise en œuvre de cette approche requiert deux briques essentielles :

- l'existence d'un réseau interconnectant tous les avions, comme les AANETs introduits dans le paragraphe précédent ;
- un service offert par le réseau permettant à un nœud d'envoyer un message vers un groupe de nœuds intéressés par le contenu du message. En effet, dans l'exemple ci-dessus, le message annonçant l'orage n'intéresse que les avions se dirigeant vers cette zone. Ainsi, la liste des destinataires dépend du contenu du message. Dans la suite de ce mémoire, nous appelons ce service **"Routage basé sur le contenu"**. Cela constitue la problématique traitée dans cette thèse, à savoir définir une solution permettant la mise en œuvre du routage basé sur le contenu dans les AANETs.

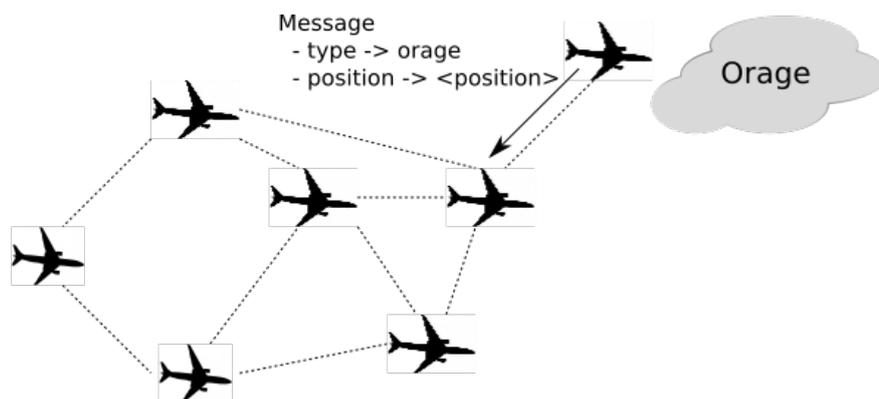


FIGURE 1.6 – Exemple de communication traitée : annonce d’un phénomène météo

1.4 Organisation du mémoire

Après ce chapitre ayant pour but de présenter le contexte de la thèse ainsi que problématique traitée, ce mémoire est structuré en quatre autres chapitres. Le suivant introduit le concept de routage basé sur le contenu. Nous présentons l’intérêt de cette approche ainsi que le paradigme publication / souscription (publish / subscribe en anglais et noté P/S dans la suite de ce mémoire) qui a été choisi pour mettre en œuvre le routage basé sur le contenu. Ce chapitre présente ensuite un état de l’art sur les systèmes P/S et notamment ceux réalisés pour les MANET.

Le troisième chapitre de ce mémoire présente la première étude conduite dans cette thèse, à savoir la modélisation de systèmes P/S existants et l’étude de leur comportement dans un contexte AANET. Pour comprendre le travail effectué, tous les choix de modélisation sont également détaillés dans ce chapitre : le module de mobilité, les applications utilisant le service P/S, l’architecture des nœuds du réseau. Tous ces choix ont été guidés par la volonté de construire un modèle réaliste même si certaines simplification ont dû être faites.

Compte-tenu des résultats obtenus avec les systèmes P/S existants, le quatrième chapitre introduit la contribution majeure de cette thèse : la définition d’un nouveau système P/S adapté aux AANETs. Ce système s’appuie sur un algorithme de regroupement développé pour les AANETs et détaillé dans ce chapitre. Cet algorithme permet de construire une surcouche sur laquelle peut s’appuyer le système. Les performances obtenues montrent la pertinence de cette solution.

Le dernier chapitre conclut ce mémoire. Il synthétise les contributions majeures de cette thèse et présente les pistes à explorer pour compléter les travaux exposés dans ce mémoire.

Chapitre 2

Routage basé sur le contenu : définition et état de l'art

Sommaire

2.1	Routage basé sur le contenu : du concept au modèle publication/souscription	18
2.2	Modèle Publication/Souscription	19
2.2.1	Définition	19
2.2.2	Caractérisation d'une architecture Publication / Souscription	20
2.3	Etat de l'art sur les systèmes de Publication / Souscription basés sur le contenu	22
2.3.1	Les algorithmes de correspondance entre les événements et les abonnements	23
2.3.2	Les algorithmes de diffusion des événements dans le réseau	26
2.4	Adaptation du modèle P/S au AANET	33
2.4.1	Problématique	33
2.4.2	Etat de l'art	34
2.5	Conclusion	39

la présentation du contexte et de la problématique ayant été exposée dans l'introduction, ce chapitre se concentre sur du routage basé sur le contenu. Après une présentation de son principe et de ses avantages, l'accent est mis sur le paradigme de communication Publication/Souscription (P/S) qui a été choisi pour l'implémentation du routage à base de contenu. Après avoir défini et caractérisé précisément ce modèle, un état de l'art sur les systèmes de P/S est proposé. Il est découpé en deux parties. La première cible les systèmes existants sur les réseaux avec infrastructure alors que la deuxième se concentre sur les solutions adaptées aux MANETs et plus particulièrement aux VANETs qui sont de part leurs caractéristiques très proches des AANETs.

2.1 Routage basé sur le contenu : du concept au modèle publication/souscription

Dans un réseau de données, les formes classiques de communication sont :

- les communications **Unicast**, permettant l'envoi d'un message vers un unique nœud ;
- les communications **Broadcast**, permettant l'envoi d'un message vers tous les nœuds d'un réseau ;
- les communications **Multicast**, permettant la diffusion d'un message vers un groupe de nœuds ;
- les communications **Anycast**, où dans ce cas le message est envoyé uniquement au nœud appartenant au groupe visé le plus proche au sens de la métrique de routage.

Dans les réseaux de données standards (comme ceux basés sur le protocole IP), le point commun entre toutes ces formes de communication est l'utilisation d'une adresse de destination identifiant le ou les destinataires, placée généralement dans l'entête. Le routage basé sur le contenu propose une approche différente. La transmission des messages dans un réseau ne se fait plus sur la base d'une adresse mais uniquement sur la base du contenu du message, c'est à dire que la liste des destinataires est déduite du contenu du message. Pour pouvoir réaliser ce type de diffusion dans le réseau, il faut évidemment que les nœuds déclarent leurs intérêts au réseau.

Le principal atout de ce modèle de communication est de permettre de décorrélérer les émetteurs de message des destinataires . Cette décorrélation a lieu à deux niveaux.

- *Dans l'espace* : le routage basé sur le contenu permet à un nœud d'émettre un message sur le réseau sans savoir qui sont les destinataires du message où même s'il y en a. C'est le réseau qui est chargé de définir les destinataires du message suivant les caractéristiques du message et les intérêts exprimés par les différents utilisateurs du réseau.

- *Dans le temps* : Lorsqu'un message est publié sur le réseau, il peut être conservé par le système P/S afin de permettre aux utilisateurs intéressés par le message mais non joignables lors de la publication de récupérer ce message lorsqu'ils redeviennent joignables.

La recherche bibliographique effectuée au début de la thèse a montré qu'une approche utilisée pour mettre en œuvre ce type de routage est de s'appuyer sur le paradigme de communication *publication / souscription* [EFGK03]. Dans le cadre de cette thèse, c'est ce choix a été retenu. Nous nous sommes donc concentrer uniquement sur les architectures de P/S pour atteindre l'objectif principal de la thèse, à savoir réaliser du routage basé sur le contenu dans les réseaux ad hoc aéronautiques.

2.2 Modèle Publication/Souscription

2.2.1 Définition

Le modèle de communication publication/souscription utilise du vocabulaire spécifique, présenté dans ce paragraphe. Ces termes sont utilisés dans toute la suite de ce mémoire.

- Évènement : il s'agit des messages échangés par ce mode de communication.
- Editeur : nœud publiant des événements sur le réseau
- Abonné : nœud ayant déclaré au système son intérêt pour certaines catégories d'événements. Cette déclaration se fait au travers d'un abonnement.
- Système de notification : fonction principale assurée par le système permettant de notifier les abonnés des événements les intéressant.

L'Applications Programming Interface (API) générique de ce modèle de communication dispose de trois primitives :

- PUBLISH(evt) : permet à un éditeur de publier un événement sur le réseau.
- SUBSCRIBE(filter) : permet à un abonné de déclarer son intérêt à certains types d'événements auprès du réseau.
- NOTIFY(evt) : Envoyé par le système aux abonnés pour leur indiquer qu'un nouvel événement les intéressant a été publié.

La figure 2.1 illustre les termes et l'API présentés dans ce paragraphe.

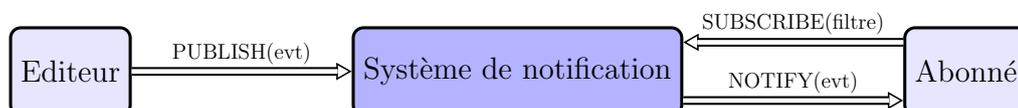


FIGURE 2.1 – Principe d'une communication basée sur le modèle Publication/Souscription

2.2.2 Caractérisation d'une architecture Publication / Souscription

Le paradigme de communication P/S étant générique, de nombreuses solutions respectant ce principe ont été proposées pour répondre à des problématiques très variées. Cette section présente certains critères permettant de caractériser une architecture P/S. Cette caractérisation permettra ensuite de concentrer l'état de l'art uniquement sur les familles de solution répondant à la problématique de la thèse.

2.2.2.1 Mode d'abonnement

Nous avons vu précédemment que lorsqu'un nœud souhaite recevoir des informations, il doit indiquer au réseau quel type de donnée il souhaite recevoir. Cela est réalisé par un abonnement. Dans le modèle P/S, il existe plusieurs modes d'abonnement, détaillés ci-dessous :

- *Abonnement basé sur un sujet (Topic Based)* : dans ce cas un système s'abonne à un "sujet" défini par un mot clé par exemple. Ensuite, lorsqu'un système publie un message sur le réseau, il indique sur quel sujet cette publication doit se faire. Tous les nœuds abonnés à ce sujet recevront son message. Il s'agit du mode d'abonnement le plus simple mais aussi le plus restrictif puisque le seul filtre utilisable est le sujet du message.
- *Abonnement basé sur le contenu (Content Based)* : il s'agit d'un mode d'abonnement plus générique que le précédent. Ici, les systèmes s'abonnent en indiquant des critères sur le contenu du message. Ces critères servent de filtre afin de ne recevoir que les messages qui les intéressent. Ces critères peuvent être définis de différentes manières, comme par exemple :
 - En utilisant une syntaxe de type "nom opérateur valeur", où l'opérateur peut être par exemple : =, > ou <. Cette syntaxe est majoritairement utilisée car elle est à la fois simple et plutôt exhaustive.
 - En utilisant des syntaxes plus complexes mais permettant de faire des filtres plus évolués, comme par exemple le Structured Query Language (SQL) ou le Extensible Markup Language (XML).
- *Abonnement basé sur le type (Type Based)* : il s'agit d'un mode d'abonnement apparu plus tardivement et qui est dépendant du langage de programmation utilisé. En effet, dans ce mode d'abonnement, les utilisateurs souscrivent à un type de données (type au sens langage objet, c'est à dire possédant des attributs voire des méthodes). Ce mode d'abonnement permet de mettre en place des filtres plus complexes sur les objets qu'on souhaite recevoir.

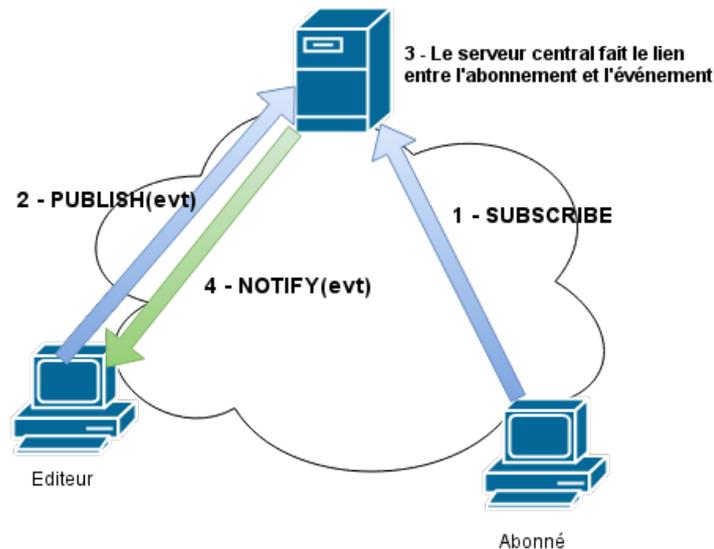


FIGURE 2.2 – Principe d'un système P/S basé sur une architecture centralisée

2.2.2.2 Architecture centralisée vs architecture distribuée

Pour la réalisation d'un système P/S, deux grands principes d'architecture existent :

- *Les architectures centralisées* : dans ce cas, comme illustré par la figure 2.2, un serveur central est mis en place. Ses fonctions sont :
 - d'accepter et de maintenir toutes les demandes d'abonnement des nœuds.
 - de recevoir les événements et de les envoyer aux nœuds intéressés.

Cette solution a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre mais son inconvénient principal est la dépendance à un serveur central qui doit être accessible en permanence par tous les nœuds du réseau.

- *Les architectures distribuées* : dans ce type de solution, le système s'appuie sur une surcouche réseau (overlay network) composée d'un nombre plus ou moins important de nœuds ayant un rôle spécifique (communément appelé *broker* dans la littérature, signifiant courtier), comme illustré par la figure 2.3. Ces *courtiers* sont les points d'entrée du système P/S. Leurs principales fonctions sont :
 - d'enregistrer les événements et les abonnements envoyés par les nœuds proches de leur position ;
 - de diffuser les événements vers les nœuds intéressés.

2.2.2.3 Problématique de la thèse et architecture compatible

L'objectif de la thèse est de développer une solution de routage basé sur le contenu (comme défini dans la première section de ce chapitre) dans un AANET. Nous avons choisi de mettre en œuvre ce service sur la base du paradigme P/S. A la suite des premières grandes familles d'architecture définies dans cette section, il a été décidé de

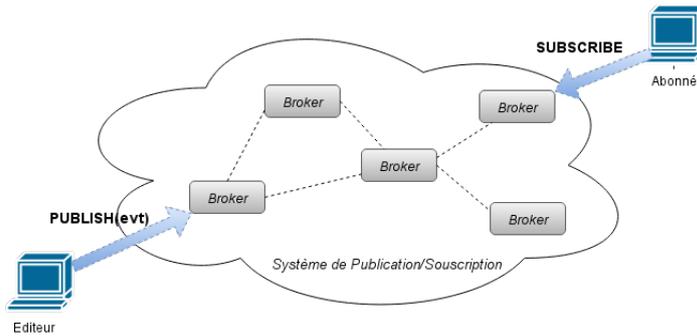


FIGURE 2.3 – Principe d’un système P/S basé sur une architecture distribuée

concentrer l’état de l’art uniquement sur les solutions de P/S avec des abonnements basés sur le contenu et s’appuyant sur une architecture distribuée.

- Au vue de la définition du routage basé sur le contenu donnée dans la section 2.1, seul le principe d’abonnement basé sur le contenu permet de répondre à la problématique posée dans cette thèse. L’état de l’art ci-dessous se limitera à cette catégorie.
- Dans la section 1.2 consacrée aux réseaux AANETs, nous avons vu que la dynamique de la topologie induit des partitions fréquentes au sein du réseau. Cela signifie que, dans le cas d’une architecture centralisée, des nœuds ne pourraient pas rejoindre temporairement le serveur central et par conséquent le service de P/S. Dans le cas d’une utilisation pour des communications aéronautiques critiques, cette perte de service est rédhibitoire. C’est pourquoi, les solutions basées sur une architecture distribuée sont plus adaptées aux AANETs.

2.3 Etat de l’art sur les systèmes de Publication / Souscription basés sur le contenu

L’objectif de cette section est de présenter les solutions de P/S existantes. Afin de mettre en relief les différentes problématiques techniques inhérentes à ces solutions, cet état de l’art est composé de deux parties, correspondant aux deux grandes missions devant être remplies par un système de P/S.

1. La première partie est consacrée aux méthodes existantes pour faire le lien entre les événements et les abonnements qui correspondent. Cette première étape est indispensable afin de déterminer la liste des nœuds intéressés par un événement donné.
2. La seconde partie se concentre sur la fonction primordiale d’une architecture de P/S : la diffusion des événements dans le réseau avec la présentation des stratégies possibles pour remplir cette mission.

2.3.1 Les algorithmes de correspondance entre les événements et les abonnements

Cette section présente les algorithmes de correspondance existants. Afin de faciliter leur compréhension, cette présentation est précédée d'un paragraphe consacré à la modélisation choisie pour représenter les abonnements et les événements.

2.3.1.1 Représentation des abonnements et des événements

Plusieurs approches existent pour cette représentation. Celle choisie durant cette thèse est la plus couramment utilisée. Elle définit un abonnement comme un ensemble de contraintes, chacune définie à l'aide du triplet $\{at, op, v\}$.

- at est une chaîne de caractère identifiant un attribut.
- op est un opérateur relationnel comme par exemple $\{=, \neq, <, >, \leq, \geq, \in\}$.
- v est la valeur sur laquelle sera testé l'opérateur.

Voici un exemple d'abonnement suivant cette représentation.

$$S_1 = \begin{cases} Symbol = EDP \\ Price < 4 \\ Volume \geq 10000 \end{cases} \quad (2.1)$$

En suivant cette représentation, un événement est alors modélisé par un ensemble de tuples (at, v) comme par exemple :

$$Evt = \begin{cases} Symbol : EDP \\ Price : 2 \\ Volume : 2000 \end{cases} \quad (2.2)$$

2.3.1.2 Algorithmes de correspondance

Le but d'un algorithme de correspondance est, pour un événement donné, de trouver tous les abonnements qui correspondent. Une heuristique simple pour résoudre ce problème est de tester pour chaque abonnement toutes les contraintes sur l'événement comme détaillé dans l'algorithme 2.1. Bien que fonctionnant, cette approche n'est pas la plus performante en termes de temps nécessaire pour trouver les abonnements correspondants. En effet, plus le nombre d'abonnements est important, plus la probabilité que des contraintes identiques se retrouvent dans différents abonnements est forte. Ces contraintes sont alors testées plusieurs fois, ce qui est non optimal. Partant de ce postulat, des travaux de recherche ont été menés afin de définir des algorithmes plus performants. Deux solutions allant dans ce sens sont présentées dans la suite de cette section.

Algorithm 2.1 Heuristique simple pour trouver les abonnements correspondants à un événement donné

```

1:  $list_S = []$ 
2: for S in Subscriptions do
3:    $m = True$ 
4:   for C in Subscriptions do
5:     if not Match(evt, C) then
6:        $m = False$ 
7:     end if
8:   end for
9:   if  $m$  then
10:     $list_S \leftarrow S$ 
11:   end if
12: end for
13: return  $list_S$ 

```

Parallel Search Trees Une des premières approches innovantes pour résoudre ce problème est Parallel Search Trees (PST) défini dans [ASS⁺99]. La caractéristique principale de cet algorithme est d’enregistrer les abonnements sous forme d’un arbre où chaque feuille est associée à un abonnement. La figure 2.4 représente l’arbre généré avec les abonnements donnés dans les formules 2.3 à 2.5.

$$S_1 = \{Symbol = EDP, Price < 4, Volume > 1000\} \quad (2.3)$$

$$S_2 = \{Price < 2, Volume = 10000\} \quad (2.4)$$

$$S_3 = \{Symbol = PT, Price = 10\} \quad (2.5)$$

A partir de ce graphe, pour un événement donné, trouver les abonnements correspondant se résume à parcourir l’arbre en testant chaque attribut dans l’ordre de l’arbre (dans notre exemple : *Symbol*, *Price*, *Volume*) puis à garder uniquement les abonnements se situant sous la branche sélectionnée. Intuitivement, on constate que l’utilisation d’un arbre permet de réduire de manière significative le nombre de test à effectuer pour trouver les abonnements et par conséquent d’améliorer les performances lors d’une montée en charge du système.

Filtrage par regroupement des abonnements [FJL⁺01] propose une autre approche pour résoudre cette problématique avec toujours comme objectif de réduire les tests pour trouver les abonnements correspondant à un événement. Ici, l’algorithme est décomposé en deux phases.

1. La première étape consiste à déterminer les contraintes issues des abonnements satisfaites par un événement donné. Pour cela, toutes ces contraintes sont regroupées en famille indexée par le doublet (attribut, opérateur). Par exemple, pour les abonnements donnés en 2.6, 2.7 et 2.8, les contraintes peuvent être classées

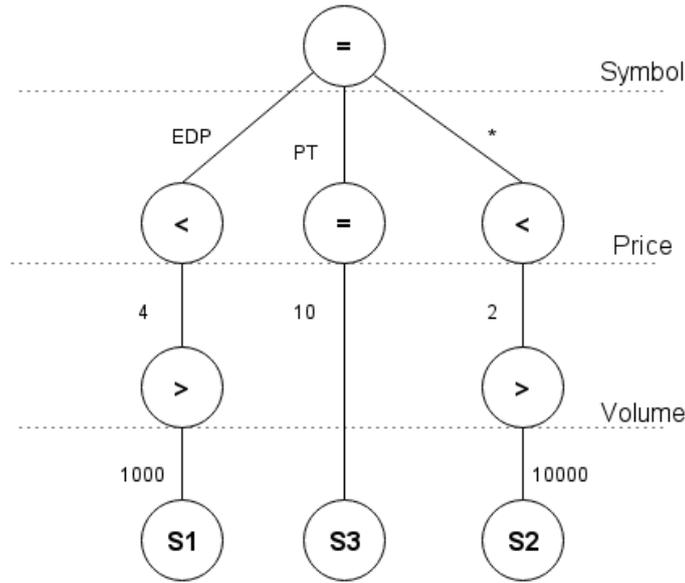


FIGURE 2.4 – Exemple de représentation des abonnements avec PST

en quatre familles : $(Price =)$, $(Price \leq)$, $(Volume >)$, $(Volume =)$. Afin de gagner en performance, l'accès à ces familles est permis grâce à l'utilisation d'index. L'algorithme permettant de trouver toutes les contraintes est décrit dans 2.2.

$$S_1 = \{Price = 20, Volume > 10\} \quad (2.6)$$

$$S_2 = \{Price \leq 15, Volume = 10\} \quad (2.7)$$

$$S_3 = \{Price \leq 12\} \quad (2.8)$$

2. Une fois les contraintes trouvées, la deuxième partie de l'algorithme consiste à récupérer, pour chaque contrainte, les abonnements la contenant pour les tester sur l'événement reçu.

Algorithm 2.2 Filtrage par regroupement : algorithme pour trouver les contraintes correspondantes

```

1: Soit  $e$  un événement  $e = (A_1, V_1), \dots, (A_n, V_n)$ 
2:  $MatchingPreds = []$ 
3: for  $A_i$  in  $e$  do
4:   Soit  $F_i$  l'ensemble des familles de contraintes ayant  $A_i$  comme attribut.
5:   for  $F_i^j$  in  $F_i$  do
6:     for  $v$  in  $V_i$  do
7:        $MatchingPreds \leftarrow MatchingPreds + F_i^j \text{search}(v)$ 
8:     end for
9:   end for
10: end for
11: return  $MatchingPreds$ 

```

2.3.2 Les algorithmes de diffusion des événements dans le réseau

Cette section présente les algorithmes de diffusion existants pour les systèmes de P/S basés sur le contenu. [MD10] fait un état de l'art détaillé des solutions existantes pour cette problématique. Pour cela, il classe les solutions en cinq grandes familles suivant la stratégie de diffusion utilisée :

1. Mise en correspondance centralisée et utilisation d'un groupe multicast à la demande
2. Utilisation d'un nombre de groupe multicast borné
3. Apprentissage par le chemin inverse
4. Utilisation de DHT (Distributed Hash Table)
5. Utilisation du concept de voisinage sémantique

Avant la présentation plus détaillée de ces familles de solutions, le premier paragraphe présente une solution triviale pouvant servir de référence.

2.3.2.1 Solution Triviale

Comme pour la problématique de faire le lien entre les événements et les abonnements correspondants, une solution triviale existe pour diffuser les événements dans le réseau. Il suffit d'envoyer les événements à tous les nœuds du réseau. Cet envoi peut être réalisé à l'aide d'une technique de *broadcast* classique (avec uniquement une détection des doublons). Les abonnements n'ont pas besoin d'être diffusés, lorsque un nœud reçoit un événement, il regarde s'il a un abonnement correspondant. Si oui, il transmet l'événement à l'application abonnée, sinon il le détruit.

Cette solution a l'avantage d'être simple et performante en terme de taux d'abonnés recevant l'événement. Néanmoins, dans un réseau comportant beaucoup de nœuds avec une répartition éparse des abonnés, elle n'est bien sûr pas optimale en termes d'utilisation des ressources.

2.3.2.2 Mise en correspondance centralisée et utilisation d'un groupe multicast à la demande

Pour cette famille de solution, l'idée directrice est qu'un éditeur souhaitant émettre un événement va commencer par déterminer la liste complète des nœuds intéressés par cet événement. Deux approches sont possibles pour cette phase :

1. Chaque nœud a une connaissance complète de la topologie du réseau et des abonnements présents sur le réseau. Cette connaissance peut être acquise à l'aide de solutions proches de celle utilisée par Open Shortest Path First (OSPF) par exemple, avec la diffusion à tous les nœuds de messages indiquant l'état des liens

et les abonnements actifs sur le réseau. A partir de ces connaissances, et du contenu qu'ils souhaitent transmettre, les éditeurs sont capables de déterminer la liste exacte des destinataires.

2. Cette connaissance est centralisée sur un unique serveur, le nœud souhaitant transmettre un événement n'a qu'à interroger ce serveur pour connaître la liste des abonnés.

Une fois la liste des destinataires connus, l'éditeur doit diffuser l'événement vers eux, soit à l'aide de communications unicast (x envois en unicast vers les x destinataires), soit à l'aide d'une communication multicast permettant la construction d'un arbre de diffusion optimisé, comme illustré sur la figure 2.5.

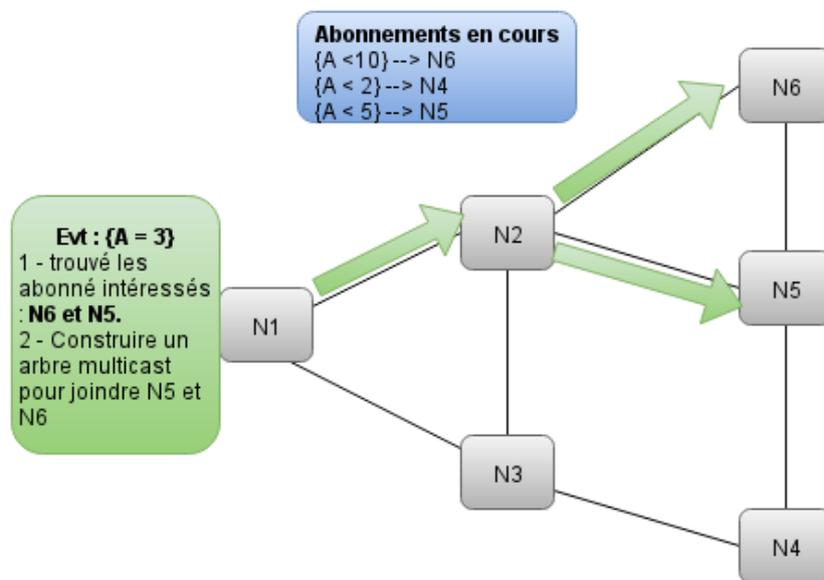


FIGURE 2.5 – Principe des solutions basées sur une mise en correspondance centralisée

[BCM⁺99] propose une solution entrant dans la deuxième catégorie avec l'introduction d'un protocole de routage multicast adapté aux systèmes de P/S basé sur le contenu. Ce protocole s'appuie sur PST défini dans le paragraphe 2.3.1.2. Chaque nœud ayant une connaissance de tous les abonnements construit un arbre PST puis le complète avec les informations de topologie. Ces informations complémentaires sont utilisées pour déterminer l'arbre optimal de diffusion lors de la réception d'un événement. MEDYM [CS05] est un autre algorithme visant à construire un arbre multicast de l'éditeur vers tous les abonnés intéressés par l'événement. Mais, dans ce cas, l'approche retenue se base sur du routage multicast explicite (comme [JC03]). Ce principe de routage ajoute la liste des destinataires dans l'entête du paquet. Les nœuds utilisent alors leur table de routage unicast pour faire suivre les messages vers les bons destinataires.

Cette famille de solution est très adaptée aux architectures centralisées ou à des réseaux de faible taille ou à topologie peu dynamique. En effet, la nécessité de distribuer

les abonnements et la topologie à l'ensemble des nœuds du réseau posera des problèmes de charge induite dans des réseaux à plusieurs milliers de nœuds.

2.3.2.3 Utilisation d'un nombre de groupe multicast borné

Pour cette famille de solution, l'idée directrice est l'utilisation d'un nombre fini de groupes multicast. Pour cela, tous les nœuds du réseau sont regroupés en groupe, une adresse multicast étant alors associée à chaque groupe. Comme pour la famille de solution précédente, les éditeurs connaissent tous les abonnements présents sur le réseau ainsi que la table faisant la correspondance entre les groupes multicast et les groupes d'abonnés. A partir de cette hypothèse, un éditeur souhaitant transmettre un événement est capable de déterminer la liste des abonnés intéressés par cet événement et par déduction la liste des groupes multicast sur lesquels il doit transmettre l'événement. Afin de réduire le nombre de groupe multicast à utiliser, ces solutions font l'hypothèse d'une architecture distribuée et se concentre sur la distribution des événements aux *courtiers*.

Pour la diffusion des abonnements et la composition des groupes sur tout le réseau, une approche similaire à celle présentée dans le paragraphe précédent peut être utilisée. La difficulté principale de cette approche réside alors dans la création des groupes. Dans [OAA⁺], plusieurs solutions sont proposées pour le regroupement des nœuds.

- Une solution simple qui utilise uniquement un groupe multicast visant tous les nœuds intermédiaires du réseau.
- CGM (Clustered Group Multicast) est une autre solution proposée. Elle vise à découper l'ensemble des *courtiers* en groupe exclusif. On peut alors démontrer que le nombre de groupe multicast à utiliser peut être réduit en fonction du nombre de nœuds composant les groupes. Pour être exact, si k nœuds sont divisés en c groupes, alors le nombre de groupes multicast nécessaires est de $c * 2^{k/c}$. Par exemple, 20 nœuds dans un seul groupe nécessitent 2^{20} adresses multicast alors que 20 nœuds divisés en 5 groupes de 4 ne requièrent plus que $5 * 2^4 = 80$. Néanmoins, l'article ne détaille pas comment opérer de manière effective ce découpage.
- TCGM (Threshold Clustered Group Multicast) est une évolution de la solution précédente. Pour chaque groupe, un seuil T est défini. Si pour un événement donné, il y a plus de T nœuds intéressés alors l'événement est envoyé à tous les membres du groupes. Cette solution permet de réduire le nombre d'adresses multicast mais nécessite que les nœuds puissent filtrer les événements.

HYPER [ZH] est une solution suivant la même idée. Ici, le regroupement se fait sur une base géographique. Le réseau est partitionné à l'aide d'une grille, chaque case de la grille correspondant à un groupe multicast.

2.3.2.4 Apprentissage par le chemin inverse

Cette famille de solutions s'inspire des techniques utilisées pour les protocoles de routage IP multicast de type *sparse*. Les demandes d'abonnement sont propagées dans le réseau de proche en proche en partant de l'abonné vers un nœud servant de racine pour la diffusion des événements (un peu sur le même principe que le point de rendez-vous avec PIM-SM [FHHK06]). A partir de cette propagation, chaque nœud peut maintenir une table d'abonnement qui sera utilisée pour propager les événements reçus, comme illustré à la figure 2.6.

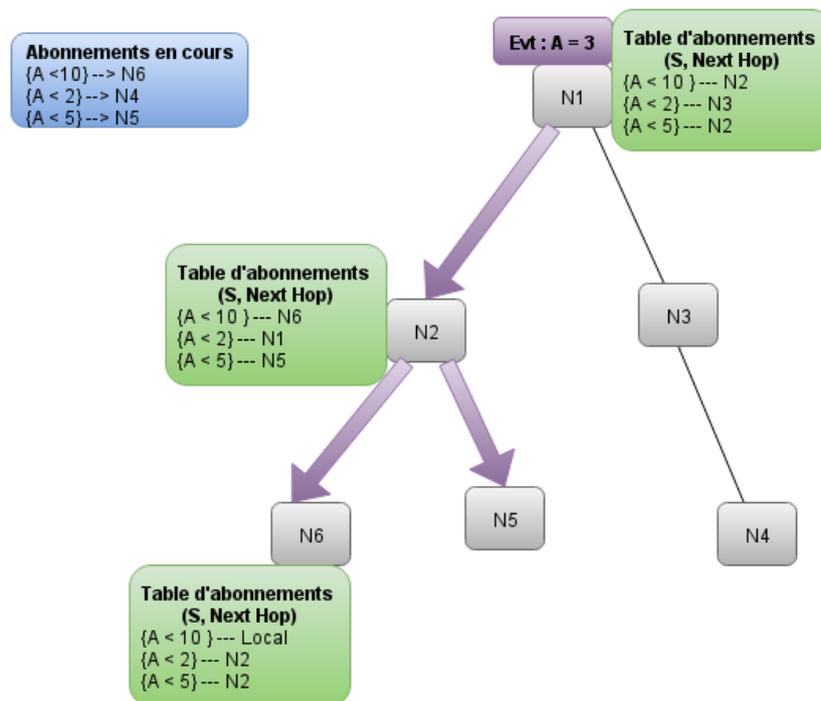


FIGURE 2.6 – Principe des solutions basées sur l'apprentissage par le chemin inverse

SIENA [CRW01] fut la première solution à suivre cette idée pour la réalisation d'un système de P/S. SIENA peut s'appuyer sur différente topologie de *courtiers*, acyclique (ce qui facilite la diffusion de l'abonnement vers la racine de l'arbre puisqu'un chemin unique existe entre les *courtiers*) mais également cyclique. Dans le second cas, lorsqu'un abonnement est diffusé sur le réseau, il faut éviter que les nœuds reçoivent le message plusieurs fois (ce qui sera le cas par défaut puisqu'il y a des boucles dans le réseau). Une solution consiste à s'appuyer sur les techniques de routage multicast avec l'utilisation du Reverse Path Forwarding (RPF). Un abonnement est rediffusé par un nœud uniquement si celui-ci a été reçu sur l'interface permettant de joindre la source du message par le chemin le plus court.

2.3.2.5 Utilisation de DHT

La mise en œuvre de réseaux Peer To Peer (P2P) décentralisés s'appuie sur l'utilisation de Distributed Hash Table (DHT). Il s'agit d'une table où chaque donnée enregis-

trée est identifiée par une clé unique. Cette table est partagée entre tous les nœuds du réseau et un mécanisme de routage est défini afin de permettre à un nœud de trouver celui stockant l'objet. La force de ce type de solution est le passage à l'échelle. En effet les solutions actuelles permettent de récupérer un élément dans la table en envoyant au maximum $\log(n)$ messages (n étant le nombre de nœuds dans leur réseau). Une autre force de ce type de solution est sa robustesse dans des réseaux dynamiques et sa capacité à assurer la redondance des données dans le réseau. Les deux principales architectures permettant de mettre en œuvre un DHT sont CHORD [SMLN⁺03] et PASTRY [RD01]. Ces deux solutions sont basées sur l'utilisation d'un espace fini de clés permettant de définir un identifiant unique dans cet espace pour chaque nœud du réseau. Un exemple est l'utilisation de clé faisant 160 bits. L'identifiant des nœuds peut alors être généré à l'aide de la fonction de hachage SHA-1 appliquée sur l'adresse IP du nœud par exemple.

Un système de communication basé sur le modèle P/S peut utiliser ces tableaux distribués comme une surcouche. Le routage des événements vers les abonnés est alors réalisé en suivant les étapes suivantes :

1. Un nœud générant un abonnement doit s'enregistrer auprès des nœuds en charge des clés caractérisant les contraintes de l'abonnement
2. Un événement est diffusé aux nœuds en charge des clés caractérisant les attributs de l'événement.
3. Les nœuds recevant à la fois des abonnements et des événements qui correspondent servent de point de rendez-vous pour diffuser le message vers les abonnés intéressés.

Afin de faciliter la compréhension de cette approche, la figure 2.7 donne un exemple avec un cas simple constitué d'un abonnement avec une unique contrainte $A = 3$ (généré par N2). Cette contrainte est transformée en clé K utilisable dans le DHT (à l'aide d'une fonction de hachage par exemple). Cet abonnement est alors stocké au niveau du nœud responsable de la clé K (N1 dans notre exemple). Lorsque N4 génère un événement avec l'attribut $A = 3$, cet attribut est également transformé en clé et obtient K . Cet événement est alors transmis à N1 qui sert donc de point de rendez-vous pour faire suivre le message à N2.

Plusieurs solutions ont été proposées sur ce principe comme [PB03], [TAJ04] ou [TA04]. La différence entre ces solutions se fait sur plusieurs points.

- Le choix de l'algorithme de DHT utilisé ;
- Le mappage entre les abonnements ou événements et les clés utilisées dans le DHT. Ce point est simple pour des abonnements avec peu de contraintes d'égalité mais dès qu'il y a des contraintes intégrant des intervalles de valeur ou des opérateurs plus évolués, la tâche se complexifie et les approches retenues sont différentes suivant les solutions. Par exemple, [TAJ04] fait le choix de partitionner

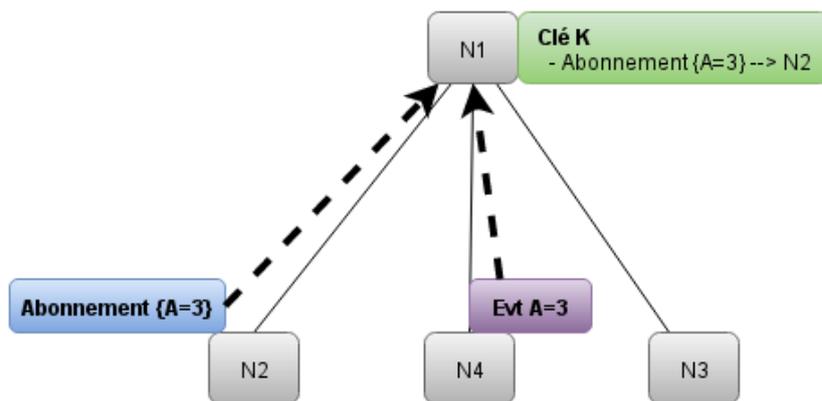


FIGURE 2.7 – Principe des solutions basées sur l'utilisation d'un DHT

les intervalles de valeur pour pouvoir générer des clés associées à chaque intervalle.

- La construction de l'arbre de diffusion multicast entre le nœud servant de point de rendez-vous et les abonnés. L'approche majoritairement retenue est celle proposée par SCRIBE [RKCD01]. Lorsqu'un nœud transmet un abonnement vers celui devant le stocker (suivant l'index généré à partir de cet abonnement), les nœuds intermédiaires enregistrent dans une table l'abonnement et le nœud précédent sur le chemin. Ainsi, un chemin est construit entre l'abonné et le nœud racine. Celui-ci sera utilisé lors de la diffusion de l'événement.

2.3.2.6 Utilisation du concept de voisinage sémantique

Dans cette catégorie de solutions, l'idée n'est plus de construire des arbres de diffusion pour les événements suivant des métriques réseau, mais plutôt de regrouper les nœuds suivant leurs "affinités", c'est à dire suivant le type de contenu qui les intéresse. Ainsi un événement publié dans le réseau sera diffusé dans des arbres regroupant tous les membres d'un groupe car il y a de forte chance qu'une grande partie du groupe soit intéressée par cet événement. Par conséquent, pour être utilisable, ces solutions imposent que chaque nœud puisse communiquer avec tous les autres et sont plutôt adaptées aux systèmes P2P ne prenant pas en compte la distance entre les nœuds.

Le système illustrant le mieux cette approche est DPS [AGD⁺06]. Ici, les groupes sont réalisés sur la base des intérêts de chaque nœud, retranscrits au travers de leurs abonnements. Un groupe est créé pour chaque attribut pouvant être utilisé dans des contraintes. Un nœud ayant des contraintes sur plusieurs attributs en choisira un de manière aléatoire pour définir son groupe d'appartenance. L'avantage de DPS est d'organiser ces groupes en arbre. Comme l'illustre l'exemple de la figure 2.8, l'arbre est construit en fonction des contraintes sur l'attribut. Le nœud avec la plus faible contrainte se retrouve à la racine de l'arbre. Comme le montre l'article, la constitution d'un arbre offre plusieurs avantages. Le plus important est d'offrir une diffusion optimale des événements au sein de l'arbre. En effet, les contraintes étant classées de la moins sélectives à la plus sélectives, si un événement n'intéresse pas un nœud, on est sûr que les nœuds

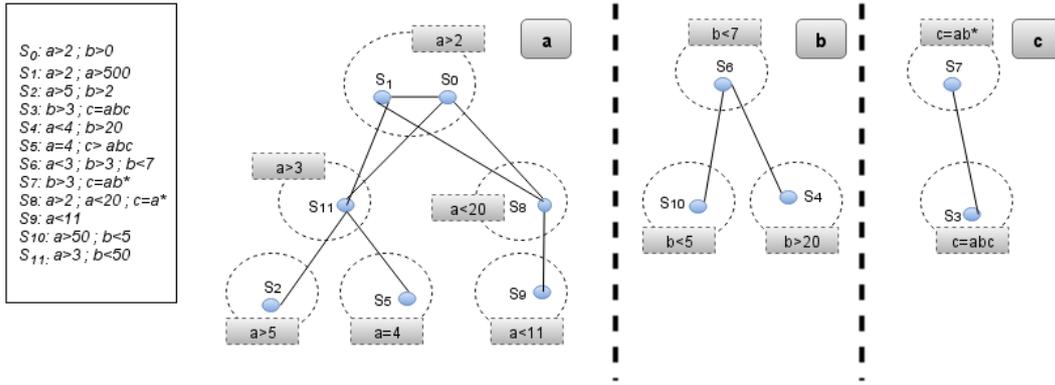


FIGURE 2.8 – Création d'arbres logiques avec DPS

positionnés en dessous dans l'arbre ne seront pas intéressés.

2.4 Adaptation du modèle P/S au AANET

La section précédente a introduit de nombreux systèmes de P/S proposés par la communauté scientifique. Néanmoins, tous ces systèmes ont été développés pour fonctionner de manière optimale sur des réseaux fixes et leur passage sur des réseaux ad hoc mobiles comme les AANETs pose certains problèmes. Après avoir posé la problématique et illustré les fonctionnalités indispensables à une architecture de P/S sur AANET, cette section fait un état de l'art sur les solutions existantes.

2.4.1 Problématique

Tous les systèmes de P/S décrits ci-dessus ont comme point commun d'avoir été pensés pour des réseaux fixes. Or, comme le montre [FPM04], ces solutions ne sont pas adaptées aux réseaux ad hoc mobiles. Les deux principaux problèmes sont les déconnexions temporaires et l'absence de prise en compte du contexte des nœuds.

2.4.1.1 Persistance des événements dans le réseau

La non-joignabilité temporaire de nœuds, voire la partition du réseau n'est pas prise en compte dans les solutions introduites précédemment. Il en résulte pour les nœuds non-joignables (par exemple suite à un déplacement au delà de la portée) une perte complète des événements émis sur le réseau durant cette période sans aucun moyen de récupérer ses messages une fois joignable de nouveau.

La solution permettant de résoudre ce problème est la mise en place de la persistance des événements dans le réseau. Cette fonctionnalité permet de maintenir dans le réseau tous les événements publiés. Ainsi, lorsqu'un nœud redevient joignable, le réseau peut lui transmettre les événements publiés lors de son absence et concordant avec ses intérêts. Afin d'optimiser la durée de stockage des événements, surtout dans des réseaux ad hoc mobiles où les ressources sont en général plus limitées, il est intéressant d'ajouter un paramètre supplémentaire aux événements et aux abonnements : la durée de vie. Ainsi la persistance dans le réseau est toujours bornée dans le temps, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources. De plus, cette notion de durée de vie est la plupart du temps cohérente avec les applications utilisatrices de ce système. En effet, si on reprend l'exemple de l'annonce d'un phénomène météo introduit dans le chapitre d'introduction, les événements générés sont toujours associés à une durée de vie puisque un phénomène météo est limité dans le temps.

2.4.1.2 Prise en compte du contexte des nœuds

Toujours en repartant de l'exemple de l'application météo, on remarque que les solutions introduites dans la section précédente ne permettent pas une utilisation optimale du réseau. En effet, dans cet exemple, un avion n'est pas intéressé par tous les

événements météo mais uniquement par ceux proches de sa trajectoire. Pour prendre en compte cette spécificité et mieux cibler les nœuds intéressés par un événement, il est nécessaire d'introduire un nouveau concept : *le contexte du nœud*. Ce contexte peut être défini comme une liste d'attributs caractérisant le nœud et permettant de filtrer plus finement les événements reçus et ainsi de réduire l'utilisation de ressources sur le réseau.

Bien que pouvant être défini de manière très générique comme dans [FR07], la majorité des systèmes de P/S prenant en compte le contexte des nœuds (comme [EGH], [MC02] ou [HEG12]) réduisent ce contexte à la position géographique puisque tous les attributs statiques peuvent être pris en compte dans les contraintes constituant les abonnements. C'est ce choix qui a été fait dans cette thèse.

2.4.2 Etat de l'art

Les AANET étant un concept très récent n'ayant pas encore fait l'objet de nombreuses études, il n'existe pas de solutions P/S qui leur soient spécifiquement adaptées. Néanmoins, comme il a été vu dans le chapitre d'introduction, les AANETs partagent de nombreuses caractéristiques avec les VANETs. Ce dernier type de réseau ad hoc a au contraire fait l'objet de nombreux travaux de recherche, notamment dans le domaine de la diffusion d'informations basée sur le contexte et les intérêts des nœuds. Les applications visées pour ce type de communication sont par exemple l'annonce d'accidents ou d'embouteillage aux voitures susceptibles d'être impactées ou la recherche de place de parking ou de station essence à proximité.

Cette section présente un état de l'art sur les systèmes de P/S adaptés au VANET. Les solutions détaillées ont été séparées suivant la topologie du réseau. La première partie se concentre sur les VANETs hybrides, c'est à dire composés de véhicules et de stations fixes disposées le long des routes alors que la seconde partie est dédiée aux solutions ne nécessitant pas d'infrastructure fixe. C'est la seconde catégorie qui nous intéresse le plus puisque, dans l'optique de pouvoir réutiliser ces propositions dans un AANET, il est indispensable que le système puisse fonctionner sans la présence de nœuds fixes.

2.4.2.1 Solutions basées sur une infrastructure fixe

La présence d'une infrastructure fixe au sein du réseau simplifie la mise en œuvre d'un système de P/S qui peut s'appuyer sur ces nœuds fixes pour assurer la persistance des événements tout en les relayant des éditeurs vers les abonnés. C'est notamment le choix qui a été fait par l'architecture proposée dans [MGG11]. Comme les solutions présentées dans le paragraphe 2.3.2.5, ce système s'appuie sur un DHT, dans ce cas CHORD, mis en œuvre sur tous les nœuds fixes du réseau. La particularité de ce système est d'utiliser CHORD pour également stocker la position des nœuds mobiles

(les voitures dans l'article puisque ce système s'inscrit dans le domaine des VANETs). Cette position est mise à jour dès que le véhicule se connecte à un nouveau nœud fixe. Cette information est utilisée lorsqu'une info-station a besoin de diffuser un événement à un véhicule. Elle récupère tout d'abord sa position puis envoie le message à l'info-station la plus proche qui le fera suivre au destinataire final.

Une autre solution intéressante est le système REBECCA [PGS⁺10], et plus précisément son extension permettant la prise en compte des nœuds mobiles [FGKZ03]. Cette extension propose une solution aux deux problématiques de mobilité qui peuvent être rencontrées.

- *La mobilité physique* qui correspond à un nœud changeant de *courtier* ou devenant non-joignable pendant un certain temps avant de réapparaître. La solution proposée par REBECCA est un processus de relocalisation où le nœud, lorsqu'il redevient joignable, envoie un message indiquant ses abonnements actifs et l'identifiant du dernier événement reçu. Suite à ce message, le *courtier* envoie un message à tous les nœuds composant la surcouche pour leur indiquer la nouvelle localisation du nœud mobile.
- *La mobilité logique* qui correspond à la mise à jour du contexte d'un nœud mobile. Cette modification doit alors être prise en compte par le système. Pour gérer ce cas, REBECCA introduit la notion de filtre de localisation, définissant une zone géographique d'intérêt. La mise à jour du contexte se traduit par l'envoi d'un nouveau filtre vers son *courtier* qui sera ensuite en charge de le propager.

2.4.2.2 Solutions ne nécessitant aucune infrastructure

La présence de nœuds fixes n'étant pas toujours possible dans un VANET, des solutions ne nécessitant pas d'infrastructure fixe ont également été proposées. Ces solutions peuvent être classées en trois catégories :

1. Les systèmes basés sur l'utilisation d'un routage géographique ;
2. Les systèmes basés sur l'utilisation d'un routage de proximité ;
3. Les systèmes basés sur une surcouche.

Elles sont détaillées dans la suite de ce paragraphe.

Les solutions basées sur un routage géographique Au début de ce chapitre, nous avons vu qu'il existait plusieurs types de communication comme par exemple unicast ou multicast. Un autre type de communication a été introduit depuis plusieurs années, particulièrement pour les réseaux ad hoc mobiles. Il s'agit des communications geocast. Dans ce cas, l'objectif est d'envoyer un message à tous nœuds situés dans une zone géographique donnée. Pour atteindre cet objectif des protocoles de routage géographique ont été imaginés. [Mai04] en fait un état de l'art.

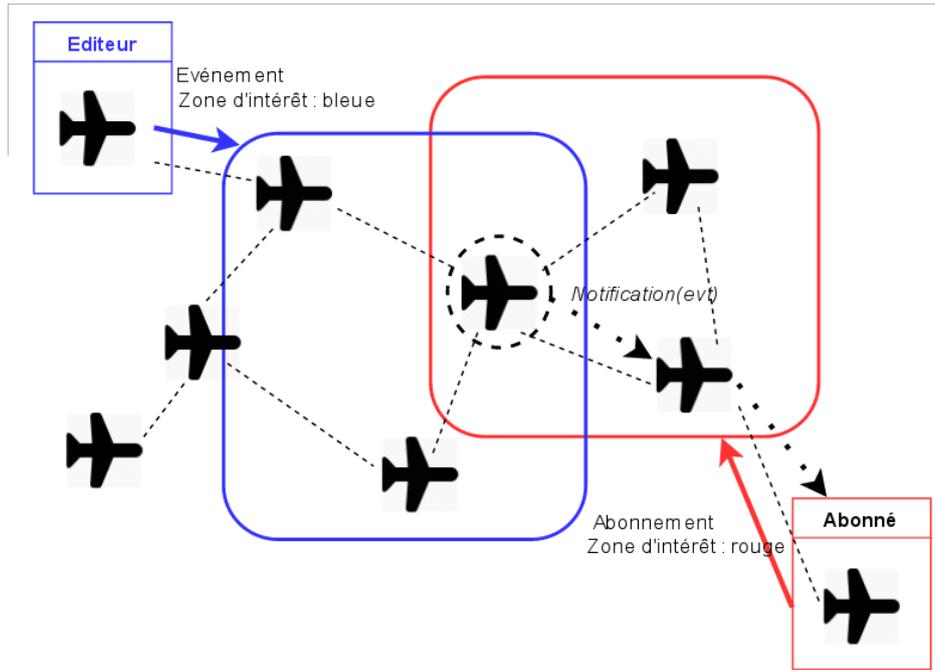


FIGURE 2.9 – Principe des solutions basées sur du routage géographique

L'approche retenue par les systèmes de P/S présentée dans ce paragraphe est de s'appuyer sur un routage géographique pour la diffusion des événements et des abonnements dans le réseau. Pour cela une hypothèse importante doit être respectée : les abonnements et les événements sont rattachés à une zone géographique donnée. Le principe est alors le suivant :

- un éditeur diffuse son événement dans la zone géographique qui lui est rattachée grâce à l'utilisation du routage géographique ;
- un abonné en fait de même pour ses abonnements ;
- lorsqu'un événement et un abonnement correspondent, cela signifie qu'en plus des contraintes respectées, l'intersection des zones géographiques est non nulle. Au niveau de la diffusion des messages, cela se traduit par le fait que l'événement et l'abonnement ont été diffusés dans une zone géographique commune ;
- si dans cette zone, des nœuds sont présents, ils peuvent servir de relais et diffuser (en unicast) l'événement vers les abonnés intéressés, comme illustré à la figure 2.9 ;

Les principales solutions dans cette catégorie sont Persistent Content-Based Dissemination (PCBD) [LCM09] et Context-Aware PS for MANET [FR07]. PCBD, étant dédié au VANET, utilise des caractéristiques spécifiques de ce type de réseau pour optimiser la diffusion. Cette solution peut fonctionner sur un réseau hybride où dans ce cas, ce sont les stations fixes dans la zone géographique visée qui reçoivent les événements et les abonnements. Et dans le cas d'un réseau purement véhiculaire, PCBD propose de s'appuyer sur les systèmes de navigation des véhicules pour diffuser les messages éga-

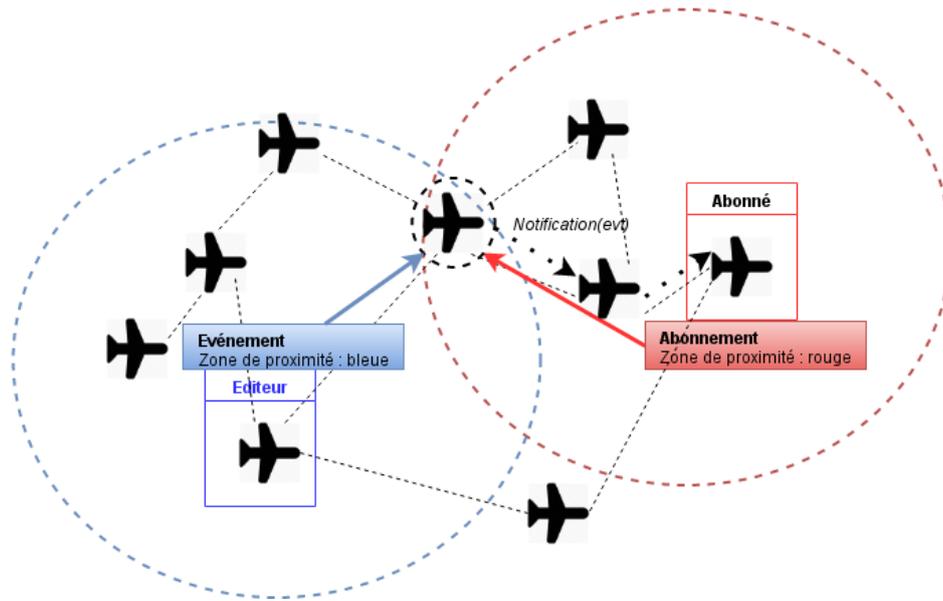


FIGURE 2.10 – Principe des solutions basées sur du routage de proximité

lement aux véhicules se dirigeant vers la zone géographique visée, augmentant ainsi les chances d’avoir un véhicule capable de faire le lien entre les événements et les abonnés intéressés.

Les solutions basées sur un routage de proximité Les systèmes de P/S entrant dans cette catégorie font l’hypothèse que pour de nombreuses applications, les nœuds intéressés par un événement sont la plupart du temps proche de l’éditeur. Dans les VANETs, de nombreux exemples existent pour corroborer cette hypothèse comme par exemple l’annonce d’un véhicule prioritaire à un carrefour ou la recherche d’une station essence à proximité. Partant de ces besoins, dans les solutions entrant dans cette catégorie, les abonnements et les événements sont transmis à tous les nœuds à proximité de l’émetteur du message. Comme pour les systèmes introduits dans le paragraphe précédent, les nœuds recevant à la fois un abonnement et un événement correspondant peuvent servir d’intermédiaire, comme illustré dans la figure 2.10.

La première solution à avoir suivi cette piste fut STEAM [MC02]. La notion de routage de proximité s’est concrétisée par l’ajout d’un filtre de proximité. Ce nouveau filtre introduit un périmètre autour de l’éditeur dans lequel l’événement sera transmis. Les nœuds proches de l’éditeur reçoivent le message et vérifient dans leurs abonnements actifs s’ils sont intéressés ou non. Adaptive Location-based Publish / Subscribe (ALPS) [HEG12] est une solution suivant la même logique mais plus évoluée. Chaque événement ou abonnement est lié à un périmètre géographique autour de l’émetteur. Trois stratégies sont alors possibles pour transmettre les événements aux nœuds intéressés..

1. *MCA (Message-Centric Algorithm)* où les éditeurs diffusent leur événement à tous les nœuds présents dans le périmètre géographique rattaché et les abonnés recevant sont chargés de filtrer (solution équivalente à STEAM introduit juste

avant).

2. *QCA (Query-Centric Algorithm)* où dans ce cas ce sont les abonnements qui sont transmis à tous les nœuds présents dans un périmètre donné et les éditeurs recevant un abonnement diffusent les événements qui correspondent.
3. *Hybrid*, comme son nom l'indique, cette solution est un mix des deux précédentes. Ici, les abonnements et les événements sont transmis dans un périmètre de proximité et on se retrouve avec le principe décrit dans la figure 2.10.

Les solutions basées sur une surcouche La dernière catégorie de solution reprend le concept d'architecture distribuée largement utilisé sur les infrastructures fixes. Des nœuds dans le réseau ont alors un rôle particulier, celui de *courtier*, et sont en charge de la dissémination des événements dans le réseau. Le principal problème à résoudre pour la mise en place d'une surcouche au dessus d'un réseau mobile ad hoc est le maintien de la connectivité entre les nœuds composant cette surcouche tout en maîtrisant le trafic réseau.

La solution la plus évoluée dans ce domaine est REconfigurable Dispatching System (REDS) [CP06]. Il s'agit d'un système de P/S basé sur le contenu adapté aux MANETs et proposant une approche modulaire. Cela se traduit par l'implémentation de plusieurs propositions pour gérer une topologie dynamique de *courtiers* (comme celle décrite dans [MCP08]). Dans ce cadre la proposition la plus intéressante pour la problématique de cette thèse est la solution détaillée dans [CMM09]. Elle introduit une nouvelle API permettant de prendre en compte le contexte d'un nœud, ainsi qu'un nouveau protocole Shortest Path Context Forwarding (SPCF) définissant comment les *courtiers* coopèrent pour offrir un système de P/S efficace.

L'API est complétée par l'introduction d'une nouvelle primitive *setContext* qui permet à un nœud de déclarer son contexte au système. Dans le cadre de cette thèse où le contexte d'un nœud est constitué uniquement de sa position géographique, cette primitive est invoquée de la manière suivante :

$$setContext(x = myPos.x, y = myPos.y)$$

L'introduction du contexte a également conduit à une modification des primitives *subscribe* et *publish* avec dans les deux cas l'ajout d'un filtre sur le contexte permettant de disséminer plus finement les événements.

Sur la base de cette nouvelle API, SPCF a été développé pour prendre en compte ce contexte dans la dissémination des événements. Pour cela, il s'appuie sur un protocole à état de lien [MRR80] et un algorithme de type Dijkstra pour construire des arbres de diffusion entre le nœud courtier responsable de l'éditeur et les courtiers disposant de nœuds intéressés par l'événement.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté un état de l'art complet sur la problématique de la thèse. Une définition précise de la notion de routage basé sur le contenu a d'abord été donnée. Elle a permis de mettre en avant les avantages de ce concept avec notamment la décorrélation complète entre l'émetteur d'un message et les destinataires. Nous avons ensuite focalisé le reste du chapitre sur les systèmes de P/S, approche majoritairement utilisée pour réaliser un service de routage basé sur le contenu. Afin de bien comprendre ce paradigme qui sera utilisé pour toute la suite de ce mémoire, son API ainsi que ses attributs caractéristiques ont été présentés. Cela a permis de restreindre le périmètre de cet état de l'art *aux solutions de P/S basées sur le contenu et reposant sur une architecture distribuée* puisque seule cette catégorie de système peut être efficace dans le cadre d'un AANET.

La suite du chapitre s'est alors concentrée sur la présentation des solutions de P/S existantes. Afin de mettre en lumière les problématiques posées et les différentes approches techniques pour y répondre, cette présentation a été découpée en deux grandes parties.

1. La première partie est dédiée aux systèmes développés pour les réseaux fixes afin de se rendre compte des différentes approches possibles comme l'utilisation de communications multicast ou de DHT.
2. La deuxième partie se concentre sur les solutions adaptées aux réseaux ad hoc mobiles et plus précisément aux VANETs puisqu'ils sont proches des AANETs en termes de caractéristiques. Pour être efficace sur des réseaux sans infrastructure, ces solutions doivent disposer de deux fonctionnalités importantes : la persistance des événements et la prise en compte du contexte des nœuds. Les solutions disposant de ces capacités peuvent être classifiées en trois types.
 - Les solutions basées sur du routage géographique ;
 - Les solutions basées sur du routage de proximité ;
 - Les solutions basées sur une surcouche.

Certaines solutions présentées dans cette partie de l'état de l'art sont très intéressantes dans le cadre de cette thèse. Par conséquent, il apparaît utile de pouvoir les tester dans un contexte AANET afin d'analyser leur performance pour ensuite en déduire une proposition de système de P/S efficace sur les AANETs. Le chapitre suivant est consacré à ces tests et aux résultats obtenus.

Chapitre 3

Etude de solutions P/S dans un contexte AANET

Sommaire

3.1	Méthodologie	41
3.1.1	Approche par simulation	41
3.1.2	Architecture des nœuds	42
3.2	Modélisation du contexte AANET	44
3.2.1	Le module de mobilité	44
3.2.2	Les applications utilisant le système P/S	47
3.3	Modélisation des systèmes P/S	54
3.3.1	Solution basée sur le routage géographique	54
3.3.2	Solution basée sur le routage de proximité	57
3.4	Etude de performance dans un contexte AANET	57
3.4.1	Les paramètres constants	57
3.4.2	Les indicateurs	58
3.4.3	Informations complémentaires sur le contexte AANET	59
3.4.4	Etude de l'heuristique simple	60
3.4.5	Etude de la solution basée sur du routage de proximité	61
3.4.6	Etude de la solution basée sur du routage géographique	62
3.4.7	Synthèse	66
3.5	Conclusion	67

Après avoir réalisé un état de l'art détaillé des solutions de publication / souscription, notamment celles adaptées aux VANETs, ce chapitre est consacré à la première contribution de cette thèse : le test de quelques unes des approches étudiées dans le chapitre précédent dans un contexte AANET. Afin de mieux comprendre le travail effectué, les deux premières parties présentent la méthodologie retenue et les choix techniques pour la modélisation du contexte AANET. Ensuite, la modélisation des systèmes de publication / souscription testés est détaillée. Les résultats obtenus sont alors présentés et commentés. Enfin la dernière partie conclut ce chapitre et introduit la suite du mémoire.

3.1 Méthodologie

L'objectif de cette section est de présenter et de justifier la méthodologie retenue pour la développement et la validation des contributions apportées dans cette thèse ainsi que de présenter l'architecture générale choisie. Cela permet de donner aux lecteurs des éléments permettant d'avoir un regard critique sur les résultats qui seront présentés dans ce chapitre et dans les suivants.

3.1.1 Approche par simulation

Le premier choix dimensionnant concerne l'approche retenue pour tous les développements et les validations effectués durant cette thèse. Dans le domaine des réseaux de communications, trois grandes stratégies existent pour proposer et valider de nouveaux protocoles.

1. l'implémentation réelle avec la mise en œuvre d'une architecture réelle, ce qui impliquerait dans notre cas, l'instanciation de nos protocoles sur des avions commerciaux ;
2. l'émulation qui consiste à mettre en place une imitation d'un comportement physique d'une machine par un logiciel ;
3. la simulation qui consiste à développer un modèle de l'architecture et à l'étudier dans un logiciel de simulation.

Dans notre cas, c'est la troisième option qui a été retenue, l'utilisation d'un outil de simulation et le développement de modèles permettant de définir une architecture P/S dans un contexte AANET. L'implémentation réelle n'était évidemment pas envisageable. De même, l'émulation aurait été très complexe à mettre en œuvre de par le nombre de nœuds à émuler (plusieurs centaines) et leur mobilité relative.

Nous avons retenue Omnet++ [VH08] pour réaliser les simulations. De plus, pour le développement des modèles, nous nous sommes appuyés sur la librairie *inet*¹ qui

1. <https://inet.omnetpp.org/>

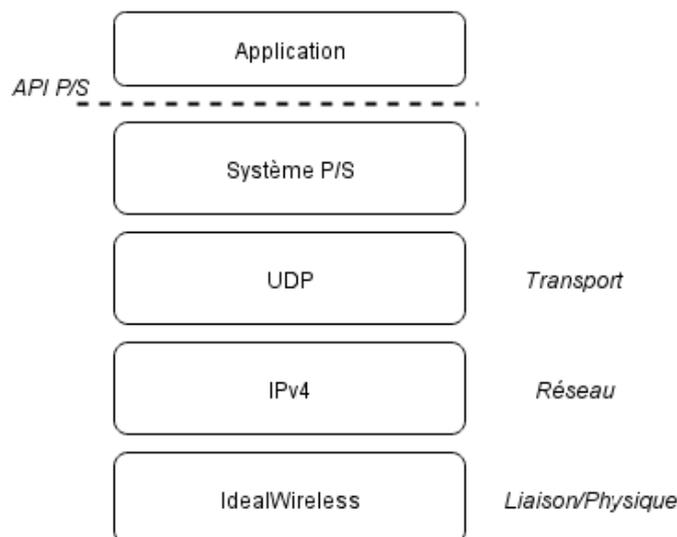


FIGURE 3.1 – Architecture protocolaire

offre de nombreuses fonctionnalités pour modéliser des réseau sans-fils.

3.1.2 Architecture des nœuds

L'approche simulation étant retenue, ce paragraphe détaille l'architecture protocolaire mise en place au niveau de chaque nœud du réseau. La figure 3.1 synthétise la pile protocolaire choisie. Les différentes couches sont explicitées dans la suite de cette section.

3.1.2.1 Niveau physique et liaison

Pour les réseaux MANET, la norme 802.11 est majoritairement utilisée pour les deux premières couches. Une version spécifique a même été développée pour les VANETs : le 802.11p (Wireless Access in Vehicular Environments). Néanmoins, ce standard n'est pas adapté pour les AANETs. La vitesse des avions (environ 800 km/h) ainsi que la portée nécessaire pour assurer une joignabilité suffisante (plusieurs centaines de km) ne sont pas compatibles avec les caractéristiques de la technologie 802.11. La thèse [Bes12], dont l'objectif principal était de démontrer la faisabilité des AANETs propose de s'orienter sur l'utilisation d'une méthode d'accès basée sur l'étalement de spectre (Code Division Multiple Access (CDMA)) permettant d'offrir des portées de plusieurs centaines de kilomètres.

L'objectif de cette thèse n'est pas de travailler sur une couche physique ou liaison adaptée aux AANETs. C'est pourquoi nous avons choisi de simplifier la modélisation de ces couches avec l'utilisation du module *IdealWireless* offert par la librairie *inet*. Dans ce modèle, les interférences ne sont pas prises en compte. Un débit et une portée sont configurés et lors de l'envoi d'une trame, tous les nœuds à portée la reçoivent. Néanmoins, les valeurs que nous avons passées en paramètre de ce modèle sont cohérentes

avec les travaux menés dans la thèse [Bes12]. Ce choix permet de se concentrer sur la problématique du routage basé sur le contenu à l'aide d'un système P/S. Par contre, il est important de souligner que tous les résultats présentés dans ce mémoire sont certainement meilleurs que ceux qu'on pourrait obtenir sur une architecture réelle. Il sera nécessaire de prévoir dans les futurs travaux l'utilisation d'un modèle plus complexe et par conséquent plus proche de la réalité.

Enfin, il est important de noter que les conditions sont similaires pour toutes les solutions étudiées lors de cette thèse et que par conséquent les comparaisons effectuées sont valides.

3.1.2.2 Niveau réseau

Au niveau de la couche réseau, le protocole IP a été retenu. Pour la version, n'ayant pas de contrainte particulière d'adressage pour notre modèle, nous avons utilisé IPv4, sachant que l'implémentation réalisée permet également une utilisation d'IPv6. L'avantage d'utiliser IP est de pouvoir potentiellement s'appuyer sur des protocoles existants permettant de faire du routage unicast et multicast et adaptés aux MANET.

3.1.2.3 Niveau transport

Selon les besoins deux protocoles de transport s'appuyant sur IP existent :

1. User Datagram Protocol (UDP) qui offre un service basique, c'est à dire sans aucun contrôle et sans garantie d'acheminement du message.
2. Transmission Control Protocol (TCP) qui offre un service connecté plus évolué. Il garantit la transmission ordonnée des messages et fait notamment du contrôle de flux.

Pour notre problématique, le choix s'est naturellement orienté vers UDP. En effet, les caractéristiques d'un AANET (comme la partition fréquente du réseau) rendent difficiles l'utilisation d'un service connecté tel que TCP.

3.1.2.4 Système P/S

Il s'agit du cœur de l'architecture puisque cette couche sera responsable de récupérer les abonnements/événements et de distribuer les événements aux nœuds intéressés par leurs contenus. Ce système s'appuie sur une couche transport (UDP) afin de profiter de tous les services offerts par les couches inférieures. Comme détailler dans le chapitre précédent, les systèmes P/S modélisés dans cette thèse doivent être capable de prendre en compte le contexte des nœuds, que nous avons simplifié par des positions ou des régions géographiques. Dans l'architecture définie sous Omnet++, ce contexte est rattaché aux événements ou aux abonnements par les applications utilisatrices du service,

charge ensuite au système de l'utiliser pour améliorer la diffusion des événements vers les nœuds intéressés.

3.1.2.5 Applications

Les applications utilisatrices du système P/S (au travers de l'API standard présentée dans le chapitre précédent) ont été implémentées comme un module Omnet++. Ces applications sont détaillées dans le paragraphe 3.2.2.

3.2 Modélisation du contexte AANET

Cette section introduit la modélisation du contexte AANET qui a été implémentée dans Omnet++. Elle est composée de deux parties.

1. la première partie détaille le module de mobilité qui a été développée pour reproduire le déplacement des aéronefs dans un AANET ;
2. la seconde partie présente les applications utilisant le service P/S qui ont été modélisées.

3.2.1 Le module de mobilité

Bien que tous les tests aient été faits sur la base de simulation, la recherche d'une solution reproduisant le mouvement des avions de manière réaliste a été un des objectifs durant cette thèse. Pour l'atteindre, nous avons choisi de faire du *rejeu* de trajectoires réelles.

Ce module de mobilité est donc basé sur des reports de positions réels faits par les avions commerciaux aux contrôleurs aériens. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes uniquement concentrés sur *le trafic transatlantique nord*. Plusieurs raisons ont motivé ce choix.

- cette région du monde a la particularité d'avoir une densité d'aéronefs fortes, due aux nombreux vols entre l'Europe et l'Amérique du Nord, alors que les moyens de communications disponibles avec des infrastructures au sol ou entre aéronefs ne sont pas nombreux puisque toutes les solutions nécessitant des stations sols (comme la VDL mode 2) ne sont pas utilisables. Cette caractéristique rend l'implémentation d'un AANET dans cette région très intéressante ;
- au dessus de cette zone, la trajectoire des avions est contrainte par la définition de routes, les North Atlantic Tracks (NATs). Cette particularité renforce l'analogie faite avec les VANET dans le chapitre d'introduction. La validation dans ce contexte de systèmes P/S issus du monde des VANET semble donc très pertinente.



FIGURE 3.2 – Exemple de NAT

Après une présentation détaillée du concept de NAT et du service Demand Data Repository (DDR) qui permet de récupérer les données de trafic, cette section précise comment a été implémenté et validé le module de mobilité qui sera utilisé pour toutes les simulations.

3.2.1.1 Les NAT

Au dessus, des zones océaniques, les contrôleurs ne disposent pas de données radar pour assurer la séparation des aéronefs. Pour néanmoins maintenir une séparation minimum nécessaire à la sécurité des vols, un concept de "route" a été introduit au dessus des océans. Les NAT sont les routes aériennes empruntées par les avions civils au-dessus de l'océan Atlantique entre l'Europe et l'Amérique du Nord. Elles sont définies par un ensemble de points de passage, comme illustré dans la figure 3.2. Afin d'optimiser le temps de parcours entre les deux continents, elles sont modifiées tous les jours en fonction des conditions météo et notamment de vent. La sécurité des vols est garantie par un espacement minimum entre les aéronefs.

- deux avions volant au même niveau sur des routes différentes doivent être séparés de 60 nautiques ;
- deux avions évoluant sur la même route au même niveau de vol doivent être séparés de dix minutes ;
- la séparation verticale est de 1000 pieds.

Pour garantir cet espacement sans couverture radar, les avions doivent reporter périodiquement leur position et leur vitesse aux contrôleurs aériens. Ces reports doivent se faire à des moments précis :

- lors du passage d'un des points du track ;
- lors d'une demande de changement de niveau de vol ;
- lorsque 45 minutes se sont écoulées depuis la dernière transmission ;
- en sortant de l'espace océanique.

Ce sont ces reports de positions qui sont utilisés dans les données DDR, introduites dans la section suivante.

3.2.1.2 Les données DDR

Le service DDR² d'Eurocontrol fournit différents types de données à ses utilisateurs. On peut y trouver des données réelles de trafic passé ainsi que des données générées à partir de prévisions de trafic. Ces données sont basées sur les données de plans de vol de la Central Flow Management Unit (CFMU)³ et sont mises à jour par des données radar en zone continentale et par des reports de position des avions en zone océanique.

Ce sont ces données qui nous ont servi de base pour la construction du module de mobilité détaillé dans le prochain paragraphe.

3.2.1.3 Implémentation du module de mobilité

Le développement du module de mobilité s'est constitué de deux étapes.

1. la première a consisté à filtrer et enrichir les données extraites du service DDR et à les exporter dans un format compatible avec Omnet++. Le filtrage a permis de ne sélectionner que le trafic transatlantique nord. Pour cela, nous avons gardé uniquement le trafic compris dans le rectangle délimité par les latitudes [23,5° - 70°] et les longitudes [-90° - 10°]. Nous avons ensuite interpolé les trajectoires des avions entre les différents reports de position par des arcs de grands cercles. Pour l'exportation, le format XML a été retenue pour sa facilité d'utilisation et son intégration dans Omnet++. La figure 3.3 donne un exemple de format de fichier obtenu en sortie. Pour chaque avion, deux parties sont générées. La première (encadrée par la balise *mobility*) contient les reports de position à une minute d'intervalle et est utilisée pour le modèle de mobilité. La seconde partie (encadrée par la balise *plan*) peut être vue comme le plan de vol de l'avion et est utilisée par l'application météo développée au dessus du service P/S (voir 3.2.2.3 pour plus de détail) ;
2. une fois ce fichier XML disponible, un module Omnet++ a été développé pour faire apparaître, déplacer et détruire des nœuds du réseau sur la base des traces disponibles dans ce fichier.

3.2.1.4 Validation

Un fois implémenté, la validation de ce modèle de mobilité s'est faite en deux étapes :

1. vérifier la bonne compréhension des fichiers XML par le module Omnet++ en utilisant des fichiers de références ;
2. vérifier la génération des fichiers XML issus du trafic réel en exportant sur une carte la position des avions à un instant fixe de la simulation.

2. <http://www.eurocontrol.int/services/ddr>

3. <http://www.cfm.eurocontrol.int>

```

<aircraft-mobility>
  <aircraft id="XX">
    <mobility>
      <position time="TT" latitude="LL"
        longitude="LL" altitude="AA"/>
      ....
    </mobility>
    <plan>
      <position time="TT" latitude="LL"
        longitude="LL" altitude="AA"/>
      ....
    </plan>
  </aircraft>
  ....
</aircraft-mobility>

```

FIGURE 3.3 – Exemple de fichier XML généré pour le modèle de mobilité

Pour la première phase de validation, plusieurs types de fichier XML ont été générés. La figure 3.4 montre un exemple avec un placement en grille des nœuds et un déplacement horizontal. Nous pouvons observer que le module de mobilité développé pour Omnet++ retranscrit correctement ce fichier.

Pour la deuxième étape, plusieurs journées de trafic ont été testées. La figure 3.5 montre le résultat au milieu d’une simulation pour le trafic aérien du 29 novembre 2014. Afin de faciliter la visualisation des positions des avions, une exportation au format KML a été réalisée. Nous observons que la position des avions est cohérente avec les données qui ont été extraites du service DDR, c’est à dire dans ce cas tous le trafic entre l’Europe et l’Amérique du nord.

3.2.2 Les applications utilisant le système P/S

L’autre brique essentielle dans la reproduction du contexte AANET est la modélisation des applications qui utiliseront le système P/S. En effet, elles généreront les abonnements et les événements qui seront traités par l’architecture P/S. Ce paragraphe présente les deux applications qui ont été modélisées et le détail de leur implémentation sous Omnet++. Afin de comprendre ce choix, la première partie de cette section présente un panel de tous les types d’application pouvant profiter d’un service P/S dans un contexte AANET, avec une classification suivant plusieurs critères.

3.2.2.1 Les applications

Dans le cadre de cette thèse, ce paragraphe présente tous les besoins de communications dans un contexte aéronautique, actuels ou futurs qui ont été répertoriés comme

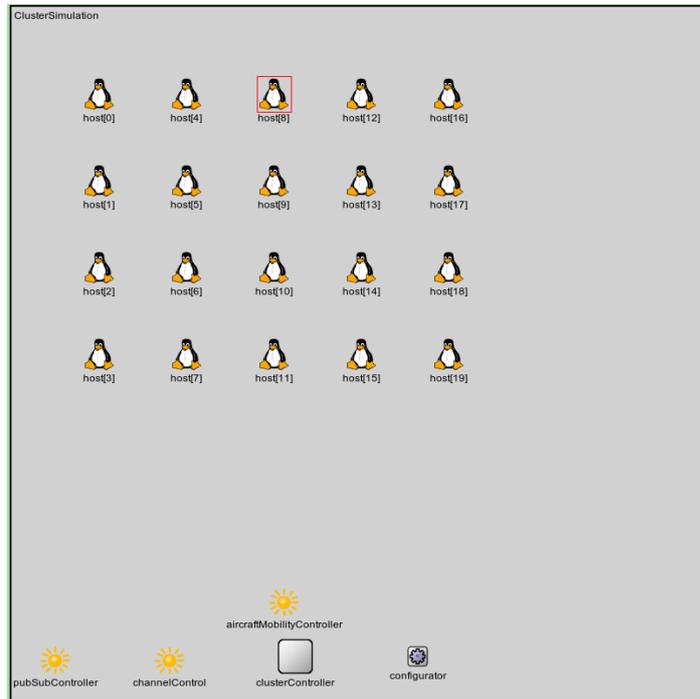


FIGURE 3.4 – Utilisation du module de mobilité pour le placement des nœuds sur une grille



FIGURE 3.5 – Utilisation du module de mobilité pour la journée du 29 novembre 2014

pouvant gagner en efficacité grâce à l'utilisation d'un service de P/S au dessus d'un AANET.

Annnonce de phénomène météo dangereux La première application est l'exemple utilisé depuis le début de ce mémoire, l'annonce d'un phénomène météo dangereux. Le plus connu est l'orage, puisque les vents violents, les éclairs voire la grêle sont des phénomènes qui peuvent potentiellement détériorer un avions et par conséquent avoir un impact sur la sécurité du vol. D'autres phénomènes, plus rares mais tout aussi dangereux comme l'apparition d'un nuage de cendre au dessus d'un volcan, pourront également être annoncés avec cette application. Dans tous les cas, l'émetteur du message est un avion détectant le phénomène météo (grâce à son radar). Les destinataires du message sont les aéronefs dont la trajectoire était initialement proche de la zone géographique du phénomène et qui par conséquent doivent modifier leur parcours afin de l'éviter.

Wind networking En plus de la connaissance des phénomènes dangereux, d'autres informations météo sont utiles pour les avions durant leur vol. C'est la cas notamment du vent qui a une influence sur la vitesse de l'avion et donc sur son temps de parcours. Or, dans le cadre des grands programmes de recherche SESAR, NextGen et CARATS dont l'objectif est d'améliorer l'efficacité et la sécurité du trafic aérien dans le monde, un nouveau concept a émergé : la trajectoire 4D (ajout de la dimension temps aux 3 dimensions d'espace). L'idée directrice est de pouvoir dans un avenir proche s'appuyer sur ces trajectoires 4D pour assurer le contrôle aérien. Pour un avion donné, cette trajectoire serait alors négociée entre le contrôleur aérien et le pilote. Elle deviendrait contraignante afin de garantir la séparation avec les autres aéronefs. Actuellement les données météo utilisées par un avion en vol pour calculer les temps d'arrivée à des points de passage, et par conséquent la trajectoire 4D sont issues de prévisions fournies par les services météo avant le départ. Sur des vols longs courriers, ces données peuvent donc dater de plus de 12h, ce qui a pour conséquence des différences notables entre les vents réels rencontrés et les prévisions. Le résultat est l'apparition d'erreurs dans le calcul de la trajectoire 4D. Afin de résoudre ce problème, des études sont actuellement menées sur le concept de "*Wind Networking*" [LRD15]. Le principe, illustré par la figure 3.6, utilise le fait que les avions sont capables de mesurer les données météo environnantes comme le vent. Partant de cette hypothèse, chaque avion annonce le vent qu'il mesure, ce qui permet à chacun de se créer une carte des vents "réels" et ainsi de mettre à jour les données utilisées pour le calcul de sa trajectoire 4D.

Pour mettre en œuvre ce concept prometteur, l'utilisation d'un service P/S au dessus d'un AANET semble appropriée. En effet, chaque avion envoie à intervalle régulier un événement avec comme contexte sa position géographique et comme contenu la valeur de vent mesurée. De l'autre côté, les avions s'abonnent aux contenus sur leur

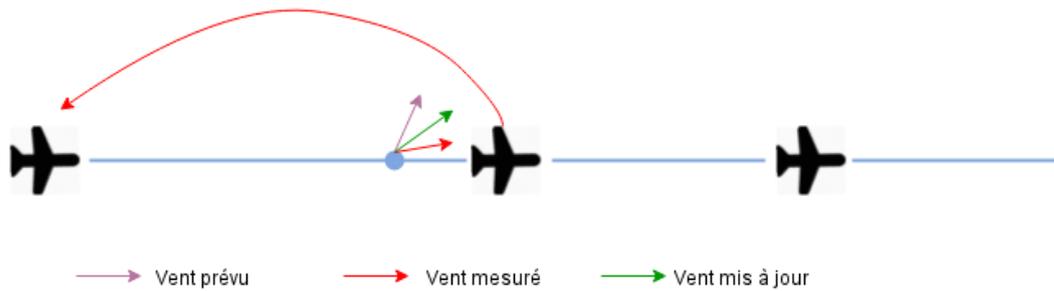


FIGURE 3.6 – Illustration du concept de "Wind Networking" dans un cas simple

trajectoire à court terme, le système P/S faisant alors le lien entre les événements et les avions intéressés, leur permettant ainsi de construire leur carte des vents.

Amélioration de l'intégrité des signaux GPS pour la navigation Pour la mise en œuvre des trajectoires 4D, une autre problématique doit être prise en compte : la connaissance pour chaque avion de sa position géographique. En effet, pour garantir le suivi de la trajectoire 4D négociée avec le sol, un avion doit connaître en permanence et précisément sa position. Pour garantir cette exigence, le concept de Performance Based Navigation (PBN) a été introduit, définissant les exigences de performance requise en termes de navigation (Required Navigation Performance (RNP)) suivant les phases de vol. Ces exigences se traduisent par deux contraintes.

- un niveau de précision requis 95% du temps. Pour atteindre cette exigence, un avion s'appuie sur du positionnement par satellite (Global navigation satellite system) amélioré par l'utilisation d'un système tiers. Ce système peut être par exemple un satellite géostationnaire (Satellite-based augmentation system (SBAS)) ou des stations sols (Ground-based augmentation system (GBAS));
- une surveillance en continu de la précision avec une alerte lorsque la précision est deux fois supérieure à celle requise 95% du temps. La technique la plus utilisée pour rendre ce service est Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM). Elle nécessite notamment la réception d'au moins 5 signaux satellites différents.

Dans le but d'améliorer cette surveillance d'intégrité, des travaux ont été menés pour faire du "RAIM collaboratif", comme proposé dans l'article [LZ13]. Dans cette approche, les avions s'échangent les signaux reçus afin d'augmenter le nombre de satellites utilisables pour l'algorithme RAIM.

Nous pouvons alors comprendre facilement l'intérêt d'utiliser un système P/S au dessus d'un AANET pour mettre en œuvre ce "RAIM collaboratif". Dans ce scénario, chaque avion génère périodiquement un événement contenant le signal reçu et le transmet au système P/S en le liant à sa position géographique. De plus, chaque avion s'abonnera aux événements générés autour de lui. Il pourra alors utiliser le contenu des messages reçus pour alimenter l'algorithme RAIM.

Communication d'une compagnie aérienne vers sa flotte Les applications précédentes présentent un intérêt pour améliorer la sécurité des vols et l'efficacité du contrôle aérien. Un autre acteur pourrait également profiter de ce type de service. Il s'agit des compagnies aérienne. En effet, le centre des opérations d'une compagnie échangent régulièrement des informations avec les avions de sa flotte en vol. Aujourd'hui, ces communications se font en point à point au dessus du réseau ACARS mais sont limitées, dû notamment au faible performance offerte par ce réseau. Avec l'existence d'un AANET, un centre d'opération pourrait échanger plus d'informations avec ses avions. La mise en œuvre d'un système P/S leur permettrait en plus d'être plus efficace pour cibler l'envoi d'un message vers un groupe d'avions, comme par exemple :

- tous les avions de la compagnie ;
- tous les avions de type A320 ;
- tous les avions se dirigeant vers un aéroport donné.

3.2.2.2 Classification

A la lecture des exemples d'applications qui profiteraient d'un service P/S au dessus d'un AANET, nous remarquons qu'il y a des similitudes entre certaines. Afin de mettre en lumière ces points communs et ne modéliser que les applications caractéristiques du point de vue du système P/S, nous avons classifié les applications présentées dans le paragraphe précédent en utilisant les critères suivant :

- le nombre d'abonnés intéressés par un événement donné (en moyenne) ;
- la répartition géographique des abonnés ;
- la taille et la fréquence des événements.

Le tableau 3.1 détaille le résultat obtenu.

	Nombre d'abonnés	Répartition des abonnés	Taille des événements	Fréquence des événements
Annonce de phénomènes météo	Faible	concentré autour de l'événement	Grande	Faible
Communication compagnie aérienne	Important	dispersé dans tout le réseau	Grande	Assez importante
Mise à jour des cartes des vents	Faible	Concentré autour de l'événement	Petite	Importante
RAIM collaboratif	Faible	Concentré autour de l'événement	Moyenne	Importante

TABLEAU 3.1 – Classification des applications pouvant s'appuyer sur un service P/S

Nous constatons que deux grandes familles d'application ressortent de ce tableau. La première catégorie regroupe les applications dont les abonnés sont situés dans une zone géographique restreinte et souvent proche de l'éditeur de l'événement. Au contraire, l'autre catégorie regroupe celles dont les abonnés sont dispersés dans tous le réseau. Par conséquent, afin d'analyser le comportement des systèmes P/S étudiés pour les

différents type d'applications, nous avons choisi de modéliser une application de chaque catégorie.

1. l'annonce d'un phénomène météo ;
2. la diffusion d'information d'une compagnie aérienne vers sa flotte d'avions ;

Les détails sur l'implémentation réalisée dans Omnet++ sont donnés dans la section suivante.

3.2.2.3 L'implémentation des applications

Annonce d'un événement météo Pour modéliser cette application sous Omnet++, plusieurs choix techniques ont dû être pris, les plus importants étant :

- la localisation des phénomènes météo et leur nombre simultané ;
- la modélisation de l'événement annonçant le phénomène ;
- la gestion des abonnements pour chaque nœud du réseau.

Pour la localisation, nous considérons que le phénomène est proche d'un avion qui sera alors chargé d'émettre l'événement vers les avions intéressés. De plus, la zone océanique étant large, il est nécessaire de permettre l'apparition de plusieurs événements de manière simultanée sur le réseau. Afin de respecter cette contrainte, nous avons choisi de nous appuyer sur un module central, ayant une connaissance de tous les nœuds du réseau. La procédure permettant la génération des phénomènes météo est détaillée dans l'algorithme 3.1. Une fois généré, ce phénomène météo doit être annoncé par l'avion

Algorithm 3.1 Génération des phénomènes météo

```
1:  $NB_{evt}$  : Nombre d'événement simultanés
2:  $Liste_{avion}$  : Liste des avions en vol
3: for  $i$  in  $1 \dots NB_{evt}$  do
4:    $Avion_{Retenue} = random(Liste_{avion})$ 
5:    $Coord_{evt} = Coord(Avion_{Retenue}) + \vec{\delta}$ 
6:    $SendEvt(Avion_{Retenue}, Coord_{evt})$ 
7:    $Liste_{avion}.delete(Avion_{Retenue})$ 
8: end for
```

le plus proche au travers d'un événement. La caractéristique principale de ce message est le contexte (c'est à dire la zone géographique) qui lui est rattaché. Dans notre implémentation, nous avons fait le choix de définir un cylindre dont

- la droite génératrice est la droite contenant la position générée dans l'algorithme 3.1 et sa projection au sol ;
- le rayon est un paramètre de la simulation ;
- la hauteur est fixé à 20km en partant du sol, sachant l'altitude de croisière d'un avion commercial est d'environ 10km.

Le dernier point à implémenter est la gestion des abonnements pour chaque avion. Opérationnellement, un avion est intéressé par un événement si sa trajectoire passe près du phénomène météo annoncé dans ce message, dans un temps inférieur à la durée de vie du phénomène. Pour traduire ce concept au niveau de la modélisation sous Omnet++, la génération des abonnements est réalisée de la manière suivante :

- chaque nœud connaît sa trajectoire au travers du modèle de mobilité décrit précédemment dans 3.2.1.3 (il s’agit de la partie encadrée par la balise `< plan >`, qui correspond au ”plan de vol” de l’avion) ;
- chaque tronçon de ce plan de vol donne lieu à la génération d’un abonnement. La zone géographique rattachée à cet événement est le tronçon de la trajectoire considérée ;
- ces abonnements sont générés et envoyés en avance de phase (configurable dans le modèle) ;
- un abonnement et un événement correspondent si le segment attaché à l’abonnement traverse le cylindre définissant la zone géographique de l’événement.

Messages d’une compagnie aérienne à sa flotte d’aéronefs Pour la modélisation de cette application, nous nous appuyons encore une fois sur les données extraites du service DDR. Ici, ce sont les identifiants des avions qui sont utilisés. En effet, les deux premières lettres correspondent à la compagnie aérienne (AF signifiant Air France par exemple). Ainsi, chaque avion génère un abonnement sur la base de cette identifiant. Deux options ont été rajoutées dans le modèle.

- la durée de l’abonnement, cela permet de renouveler périodiquement son abonnement au système P/S, ce qui peut être utile dans le cas d’un partitionnement temporaire du réseau par exemple ;
- la probabilité d’abonnement, cela permet de modéliser la cas d’événement ne visant qu’une partie de la flotte de la compagnie ;

Pour la génération et l’envoi des événements, l’AANET modélisé dans cette thèse ne dispose pas de station sol. Par conséquent, il est difficile de modéliser un centre des opérations d’une compagnie aérienne. Nous avons donc choisi que ce serait les avions qui généreraient des événements régulièrement avec une probabilité donnée en paramètre du modèle. De même, la durée de validité des événements est un paramètre du modèle. Une différence importante par rapport à l’application décrite dans la section précédente est la zone géographique couverte. Ici, nous souhaitons envoyer un message à tous les avions de notre compagnie, ce qui implique que la zone couverte par l’événement soit la globalité du réseau.

3.3 Modélisation des systèmes P/S

Après la modélisation du contexte AANET, cette section présente les systèmes P/S imaginés pour les MANET et VANETs qui ont été évalués. Sur la base de l'état de l'art présenté dans le chapitre précédent, trois solutions ont été modélisées.

1. une heuristique simple, décrite au paragraphe 2.3.2.1, qui consiste envoyer les événements à tous les nœuds du réseau. Cette solution servira de référence dans l'analyse des résultats puisque, de manière intuitive, nous savons qu'elle offrira de bonne performance en termes d'acheminement des événements vers les abonnés avec en contrepartie une utilisation non optimale de la bande passante du réseau ;
2. une solution s'appuyant sur l'utilisation de routage géographique comme décrit au paragraphe 2.4.2.2 ;
3. une solution s'appuyant sur le concept de routage de proximité comme décrit au paragraphe 2.4.2.2 ;

La seule catégorie de solution qui n'a pas été testée est celle contenant les solutions s'appuyant sur une surcouche, présentées au paragraphe 2.4.2.2. Ce choix est justifié par le fait que peu de solutions sont proposées et que la plus avancée, [CMM09], s'appuie sur un algorithme complexe à état de lien impliquant un trafic de service très important sur le réseau pour que chaque nœud puisse maintenir l'état de la topologie. Pour les solutions 2 et 3, les détails sur la modélisation sous Omnet++ sont donnés dans la suite de ce paragraphe.

3.3.1 Solution basée sur le routage géographique

Cette solution reprend le principe général décrit dans le paragraphe 2.4.2.2, à savoir :

- les abonnements et les événements sont diffusés dans la zone géographique qui leur est rattachée ;
- un nœud recevant un événement et l'abonnement correspondant sert d'intermédiaire et transmet l'événement au nœud à l'origine de l'abonnement.

Pour modéliser ce principe, certains choix ont du être faits. Les plus importants concernent le routage géographique choisi et la solution retenue pour transmettre l'événement aux abonnés intéressés. Ils sont détaillés ci-dessous.

Choix du routage géographique Pour ce choix, nous avons repris celui utilisé par la solution décrite dans [FR07], à savoir Location Based Multicast (LBM) présenté dans l'article [KV99]. Ce protocole se base sur deux concepts importants.

- le premier est appelé région cible ("Multicast region" dans l'article). Il s'agit de la zone géographique visée. Tous les nœuds localisés dans cette zone devront recevoir le message ;

- liée à cette région cible, LBM introduit également la notion de "zone d'acheminement" ("Forwarding Zone" dans l'article). Elle est utilisée par les nœuds sources et intermédiaires pour faire suivre le message de proche en proche jusqu'à la zone géographique visée. Cette zone d'acheminement est donc toujours plus large que la région cible.

La figure 3.7 illustre ces concepts. Lorsqu'un nœud veut envoyer un message lié à une zone géographique, il définit une "zone d'acheminement" puis envoie son message à tous ces voisins. Deux cas de figure se présentent :

1. les nœuds non localisés dans la "zone d'acheminement" jettent le message ;
2. les nœuds localisés dans la "zone d'acheminement" font suivre le message à tous leurs voisins.

Comme pour les protocoles de routage multicast plus classiques, un mécanisme permet d'éviter les boucles en détectant les messages déjà reçus.

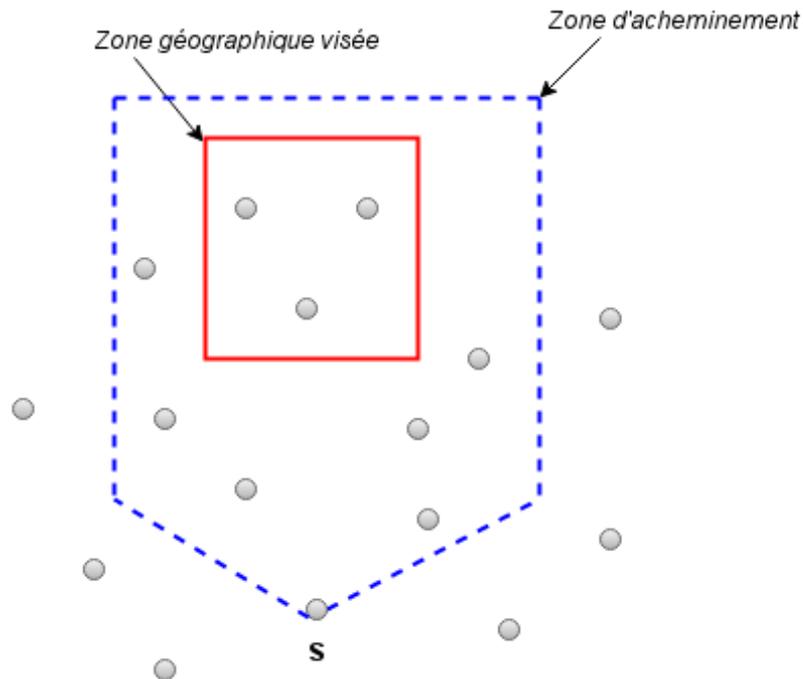


FIGURE 3.7 – LBM : concept de zone géographique visée et zone d'acheminement

La difficulté de LBM réside alors dans la définition de la "zone d'acheminement". Il faut trouver une taille et une forme offrant un compromis pour permettre l'acheminement du message tout en évitant d'envoyer le message à trop de nœuds inutilement. Dans l'article [KV99], deux propositions sont faites pour la construction de cette zone.

- la première idée est de la définir comme le plus petit rectangle (en partant de l'hypothèse d'un espace en 2D) contenant la source du message et la zone géographique visée ;
- la seconde proposition ne définit plus une forme géographique statique comme zone d'acheminement. Avant d'envoyer le message à ses voisins, la source ajoute

deux informations au message envoyé : sa position et la position du centre de la zone géographique visée. Si $DIST_S$ représente la distance entre la source et le centre de la zone géographique visée et $DIST_I$ la distance entre un voisin recevant ce message et cette même zone alors ce voisin fait suivre le message si et seulement si :

$$DIST_S + \delta \geq DIST_I$$

δ est un paramètre du protocole. De plus, ce voisin remplace la position de la source par la sienne dans le message avant de le faire suivre. Ce principe est répété jusqu'à atteindre la zone géographique ciblée.

L'implémentation réalisée sous Omnet++ dans le cadre de cette thèse utilise la deuxième stratégie qui s'applique naturellement à un espace à 3 dimensions. De plus, nous avons implémenté une autre stratégie. Il s'agit de définir la zone d'acheminement comme un cône dont le sommet est la source du message et l'axe est la droite contenant le sommet et le centre de la zone géographique cible, comme illustré par la figure 3.8. L'angle d'ouverture du cône est un paramètre du protocole permettant de jouer sur la taille de la zone d'acheminement.

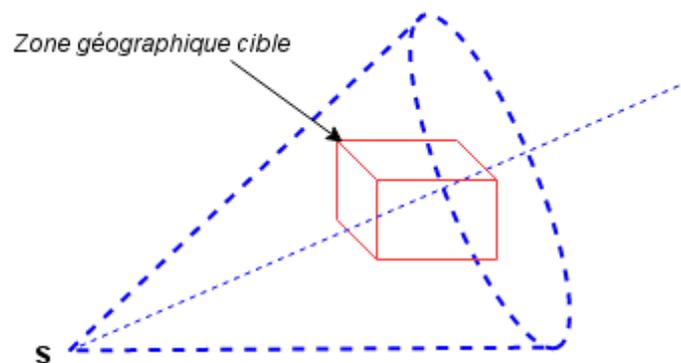


FIGURE 3.8 – LBM : utilisation d'un cône comme zone d'acheminement

Envoi de l'événement à l'abonné Lorsqu'un nœud sert de point de rendez-vous, il doit faire suivre l'événement au nœud intéressé, sachant que celui-ci n'est pas obligatoirement proche. Pour cela, nous avons choisi de nous appuyer sur un protocole de routage IP unicast puisque de nombreuses solutions adaptées au MANET existent. Nous avons choisi de retenir un protocole de type *réactif*. Ce choix est motivé par l'utilisation qui est faite de ce protocole. Il s'agit en effet d'une utilisation très ciblée puisque limitée aux communications entre un nœud servant ponctuellement de point de rendez-vous et les nœuds intéressés par l'événement.

Parmi les protocoles existants, nous utilisons Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV) [PBRD03]. C'est un protocole de référence pour les MANETs dans le sens où il a été beaucoup étudié par la communauté scientifique et a fait l'objet d'une Request For Comments (RFC). Lors de cette thèse, nous avons utilisé l'implémentation proposée dans la librairie *inet* déjà utilisée pour la modélisation des nœuds.

3.3.2 Solution basée sur le routage de proximité

Cette solution reprend le principe général décrit dans le paragraphe 2.4.2.2, à savoir :

- les abonnements et les événements sont transmis à tous les nœuds à proximité de l'émetteur du message ;
- un nœud recevant un événement et l'abonnement correspondant sert d'intermédiaire et transmet l'événement au nœud à l'origine de l'abonnement.

Le périmètre de diffusion est un paramètre du système P/S. Comme pour la solution précédente, AODV a été choisi comme protocole de routage ad-hoc pour qu'un nœud servant de point de rendez vous puisse transmettre l'événement aux abonnés intéressés.

3.4 Etude de performance dans un contexte AANET

La modélisation du contexte AANET et des systèmes P/S étudiés ayant été présentés dans les paragraphes précédents, nous nous concentrons maintenant sur l'évaluation de performance de ces systèmes. Avant cette évaluation proprement dite, cette section présente tout d'abord des informations utiles à la compréhension de ces résultats, à savoir le paramétrage du contexte AANET utilisé pour toutes les simulations et les indicateurs utilisés pour évaluer les systèmes P/S.

3.4.1 Les paramètres constants

Le tableau 3.2 présente les constantes pour toutes les simulations présentées dans ce chapitre.

Afin d'évaluer les solutions dans différentes situations, plusieurs journées de trafic ont été utilisées en entrée des simulations. Les résultats trouvés sont très similaires entre ces différentes journées. Ce comportement s'explique par le profil du trafic aérien au dessus de l'océan atlantique nord. Ce trafic est composé majoritairement de vol régulier utilisant les NATs décrites précédemment, et par conséquent deux journées proches au niveau calendaire sont très semblables en termes de nombre d'avion et de trajectoire. Par contre, il peut y avoir des différences entre certaines périodes de l'année. Par exemple, en moyenne, il y a bien plus de trafic durant l'été. C'est pourquoi, pour

Durée de la simulation	24h
Jours simulés	25/12/2012 et 28/06/2013
Options de la couche physique	
Portée	350 km
Débit de la couche physique	1 Mb/s
Options liées à l'application météo	
Durée d'un événement	uniform(1800s, 3600s)
Durée des abonnements	1h
Diamètre de la zone couverte par un événement	250km
Taille d'un message d'abonnement	2048 Octets
Taille d'un message de type événement	11192 Octets
Nombre d'événements simultanés	4
Options liées à l'application compagnie aérienne	
Durée d'un événement	uniform(300s, 600s)
Durée d'un abonnement	2h
Taille d'un message d'abonnement	2048 Octets
Taille d'un message de type événement	11192 Octets

TABLEAU 3.2 – Paramètres communs à toutes les simulations

la suite de ce mémoire, les résultats pour deux journées de trafic seront présentés. La première (25 décembre 2012) est une journée durant laquelle le trafic commercial est faible comparée à la seconde (28 juin 2013) située durant l'été.

Au niveau de la couche physique, comme indiqué à la section 3.1.2.1, nous avons choisi de nous appuyer sur un modèle simplifié mais en essayant de choisir des débits et des portées cohérents avec les solutions techniques étudiées actuellement pour offrir une couche MAC performante sur un AANET. En nous appuyant sur les travaux présentés notamment dans la thèse [Bes12], nous avons retenu une portée de 350 km permettant d'offrir une bonne joignabilité des nœuds et un débit d'1 Mbits/s qui est l'ordre de grandeur de débit atteignable avec cette technologie.

3.4.2 Les indicateurs

Pour étudier les performances d'un système P/S, il est indispensable de disposer de bons indicateurs. Afin d'identifier les plus pertinents, un état de l'art sur les indicateurs existants a été fait. Quatre sont communément utilisés, ils sont présentés ci-dessous.

- **Charge totale sur le réseau** (Total Cost of Network) : cet indicateur est très utilisé pour évaluer ce type d'architecture (par exemple dans [CRW01] et [XZ10]). Il s'agit du nombre total d'octets envoyés (que ce soit de la signalisation ou des données utiles) pour notifier les abonnés intéressés par des événements publiés par les éditeurs. En valeur absolue, cet indicateur est très difficilement exploitable. Par contre, il est très intéressant lorsqu'on l'utilise de manière relative pour comparer des solutions entre elles. En effet, il permet de comparer la charge induite par un

système P/S sur le réseau.

- **Ratio d'événements délivrés** (Delivery Ratio) : Pour chaque événement, cet indicateur correspond au rapport entre le nombre d'abonnés ayant reçu l'événement et le nombre total d'abonnés intéressés par cet événement. Il permet de mesurer l'efficacité du système P/S dans sa principale fonction : transmettre les événements uniquement vers les abonnés intéressés.
- **Nombre de faux positif** (False positive number) : il s'agit ici du nombre d'événements reçus par des abonnés qui n'étaient pas intéressés par le contenu.
- **Délai** (Delay) : il s'agit du délai entre l'émission d'un événement par un éditeur et sa réception par tous les abonnés intéressés par le contenu de ce message. Cet indicateur est surtout intéressant dans une application de type temps réel.

Pour cette thèse, seuls deux de ces indicateurs ont été utilisés pour mesurer les performances d'une architecture P/S : la charge totale induite sur le réseau et le ratio d'événements délivrés. Vu que dans le contexte des AANETs, on s'intéresse à des systèmes P/S assurant la persistance des événements dans le réseau, le délai n'est pas pertinent. Quant au nombre de faux positifs, cet indicateur est corrélé à la charge totale sur le réseau, puisqu'un nombre important de faux positif va obligatoirement augmenter la charge sur le réseau.

3.4.3 Informations complémentaires sur le contexte AANET

Avant d'analyser le comportement des systèmes P/S évalués dans ce chapitre, ce paragraphe donne des informations complémentaires sur le contexte AANET modélisé sous Omnet++. Ces données seront utiles pour expliquer les résultats présentés dans la suite de ce chapitre. La première information intéressante concerne le nombre d'avion en vol à chaque instant de la journée. La figure 3.9 montre les valeurs obtenues pour les deux journées étudiées dans ce mémoire.

Ces graphiques nous confirment que le trafic est bien plus important lors de la journée du 26 juin 2013 (plus du double d'avion tout au long de la journée) avec un pic à plus 400 avions. Par contre, les tendances sont identiques. Nous distinguons que le trafic au dessus de l'océan Atlantique Nord est organisé en deux flux principaux. Un premier le matin qui correspond au départ depuis l'Europe et le second dans la soirée qui correspond au départ depuis l'Amérique du nord.

Une autre information utile est le profil de données envoyés par les applications. Le tableau 3.3 donne le nombre d'abonnement et d'événements générés en moyenne durant une simulation d'une durée de 24 heures.

Nous notons qu'il y a un rapport de 5 entre le nombre d'abonnements générés par les applications et le nombre d'événements. Ce ratio a un impact direct sur les performances des solutions étudiées dans la suite de ce chapitre, notamment en terme de

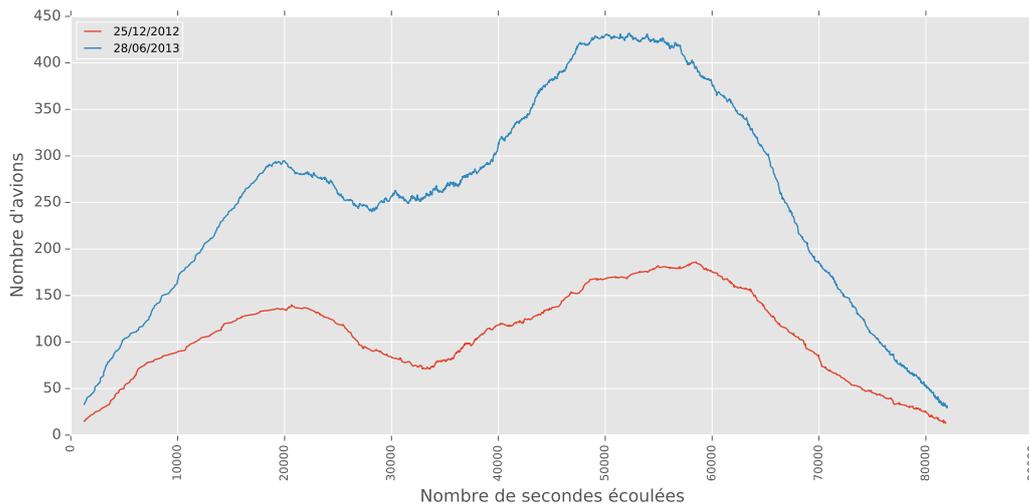


FIGURE 3.9 – Nombre d’avions en vol

	Moyenne	Ecart Type
Nombre d’événements générés	3369.8	42.6
Nombre d’abonnement généré	16886.5	2.4

TABEAU 3.3 – Nombre d’abonnements et d’événements générés durant une simulation

charge sur le réseau puisque par exemple, certaines solutions diffusent les abonnements alors que d’autre non.

3.4.4 Etude de l’heuristique simple

Les premiers résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.4. Chaque entrée du tableau contient l’intervalle de confiance à 95%. C’est sous cette forme que sont présentés tous les résultats mis sous la forme de tableau, dans ce chapitre et dans les suivants.

Journée étudiée	25/12/2012	28/06/2013
Ratio d’événements transmis	$61.20 \pm 0.5\%$	$76.7 \pm 0.5\%$
Charge totale sur le réseau (en Gbits)	2.7 ± 0.03	$19.36 \pm 0.29\%$

TABEAU 3.4 – Résultats obtenus pour l’heuristique simple

Nous obtenons des ratios d’événements délivrés d’environ 61% pour la journée du 25 décembre 2012 et de 76% pour la journée du 28 juin 2013. Par conséquent, malgré l’envoi des événements à tous les nœuds du réseau, nous n’obtenons pas un ratio de 100%. Deux raisons peuvent expliquer ce résultat.

1. comme présenté dans le chapitre d’introduction, une des caractéristiques principales des AANETs est sa topologie dynamique qui induit un partitionnement du réseau. Ces fractionnements du réseau font que lors de l’envoi d’un événement tous les nœuds ne le reçoivent pas forcément, même s’ils sont intéressés. De plus,

ce risque de partitionnement est plus important lorsque que la densité de nœuds est faible. C'est pourquoi le ratio est meilleur pour la journée du 28 juin 2013 durant laquelle le nombre d'avion en vol est bien plus important que pour la journée du 25 décembre 2012 ;

2. un autre phénomène peut également faire baisser ce ratio. Il est lié au fait que le système P/S n'assure pas de persistance des événements puisque leur diffusion ne se fait qu'une seule fois, au moment de leur création. Il peut donc arriver des cas où un avion entrant dans la zone étudiée soit intéressé par un événement généré il y a quelques temps mais toujours actif. Cet événement ayant déjà été diffusé, il ne pourra pas le recevoir.

3.4.4.1 Introduction de la diffusion périodique des événements

Afin de mettre en avant les problèmes identifiés ci-dessus, ce système P/S a été modifié afin que l'éditeur d'un événement le réémette périodiquement (l'intervalle entre deux émissions est un paramètre du modèle). Ainsi, si un aéronef apparaît après la première émission de l'événement, il peut néanmoins le recevoir lors d'une de ces retransmissions par l'éditeur. Ce principe permet donc d'assurer de manière simple une persistance des événements dans le réseau. La tableau 3.5 présente les résultats obtenus pour une retransmission des événements toutes les 60 secondes.

Journée étudiée	25/12/2012	28/06/2013
Ratio d'événements transmis	$63.17 \pm 0.24\%$	$79.1 \pm 0.31\%$
Charge totale sur le réseau (en Gbits)	23.27 ± 0.57	159.24 ± 0.48

TABLEAU 3.5 – Résultats obtenus pour une retransmission des événements toutes les 60s

Comme attendu, le ratio d'événements délivrés augmente mais de manière très faible (de 2 à 3 %). Cela signifie que les cas où un abonné ne reçoit pas un événement qui l'intéresse sont majoritairement dus à des problèmes de joignabilité entre l'éditeur et l'abonné. Nous pouvons donc considérer que le ratio obtenu ici est le maximum envisageable pour l'AANET étudié et servira donc de référence pour l'étude des autres solutions. Si nous voulions améliorer ce ratio, il faudrait envisager la mise en œuvre de stations sol comme cela a été fait dans l'étude de faisabilité des AANETs réalisée dans la thèse [Bes12].

3.4.5 Etude de la solution basée sur du routage de proximité

Les figures 3.10 et 3.11 montrent les résultats obtenues pour respectivement les journées simulées du 25 décembre 2012 et du 28 juin 2013. Chaque figure contient des graphiques montrant les indicateurs mesurés (présentés à la section 3.4.2) suivant la largeur de la zone géographique de proximité dans laquelle les événements et les abonnements sont diffusés.

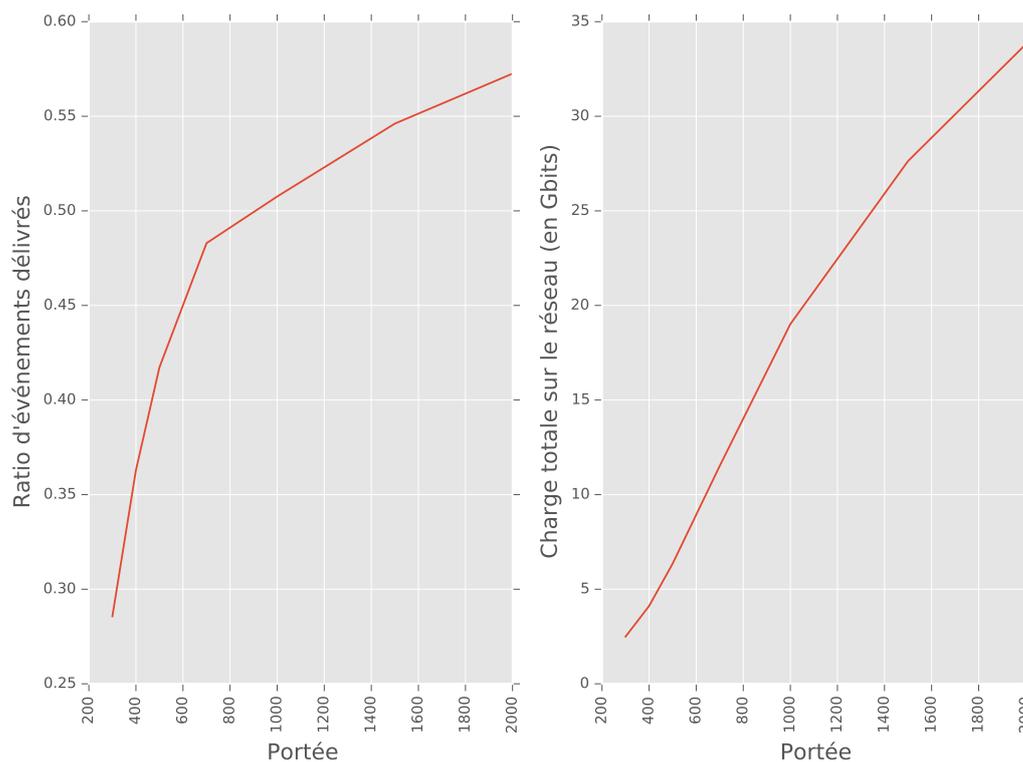


FIGURE 3.10 – Solution basée sur un routage de proximité : résultats pour la journée du 25 déc 2012

Logiquement, plus la zone géographique de diffusion des événements et des abonnements est large, plus le ratio d'événements délivrés est important avec, en contrepartie, une augmentation importante de la charge induite sur le réseau. Néanmoins, nous remarquons que pour atteindre un ratio d'événements délivrés se rapprochant de celui obtenu avec l'heuristique simple, le zone de diffusion doit être large (2000 km) avec pour conséquence une charge induite sur le réseau très importante (10 à 15 fois supérieure).

3.4.6 Etude de la solution basée sur du routage géographique

Afin d'analyser les performances de cette solution, les choix techniques qui nous semble dimensionnant pour système P/S, à savoir le protocole du routage géographique et le protocole de routage unicast, ont été étudiés. Les résultats obtenus sont présentés dans la suite de cette section.

Influence du routage géographique Afin de mesurer l'influence de LBM sur les performances du système P/S, les figures 3.12 et 3.13 montrent les résultats obtenus suivant la stratégie utilisée pour générer la zone d'acheminement pour la journée du 25 décembre 2012. Les figures 3.12 et 3.13 en font de même pour la journée du 26 juin 2013 (pour cette journée, les simulations ont été limitées à 6h de trafic rejoué pour des questions de capacité des serveurs utilisés). Pour l'utilisation d'une zone d'acheminement basée sur un cône, des simulations ont été faites avec différentes valeurs d'angle

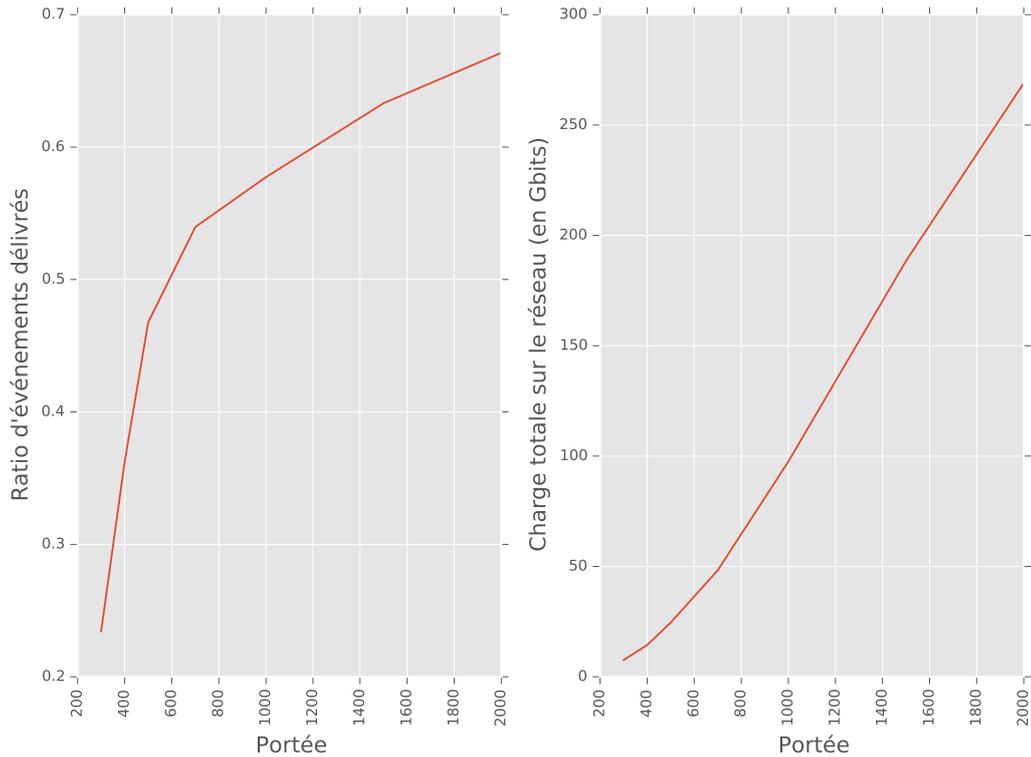


FIGURE 3.11 – Solution basée sur un routage de proximité : résultats pour la journée du 28 juin 2013

d'ouverture du cône. De même, pour l'étude de la stratégie basée sur la distance par rapport à la zone géographique visée, les simulations ont été réalisées en faisant évoluer le paramètre δ .

Nous constatons que la stratégie utilisée n'a pas une grande influence sur les résultats obtenus. Dans tous les cas, le ratio obtenu est proche de 60% pour la journée du 25 décembre 2012 et le volume cumulé sur le réseau est de l'ordre de 60 Gbits. Il en est de même pour la journée du 28 juin 2013 où le ratio est légèrement supérieur à 80% dans tous les cas. Par conséquent, ce système P/S est bien moins performant que celui basé sur la diffusion des événements dans tout le réseau puisque pour un ratio d'événements délivrés équivalents, la charge induite sur le réseau est environ 25 fois supérieure.

Influence du routage IP unicast Un autre point intéressant à étudier est l'influence du protocole de routage unicast choisi. Comme indiqué dans la section 3.3.1, nous avons choisi de nous appuyer sur AODV. Afin de valider la pertinence de ce choix, le tableau 3.6 compare les résultats obtenus suivant l'utilisation d'AODV ou d'une solution de routage unicast "idéal" développé dans le cadre de cette thèse pour la journée du 25/12/2012. Ce routage part du principe que chaque nœud a une connaissance de toute la topologie du réseau et peut ainsi calculer le chemin le plus court pour joindre un nœud sans avoir à échanger d'information avec les autres nœuds du réseau.

Les résultats nous montrent que le ratio d'événements délivrés est à peu près le

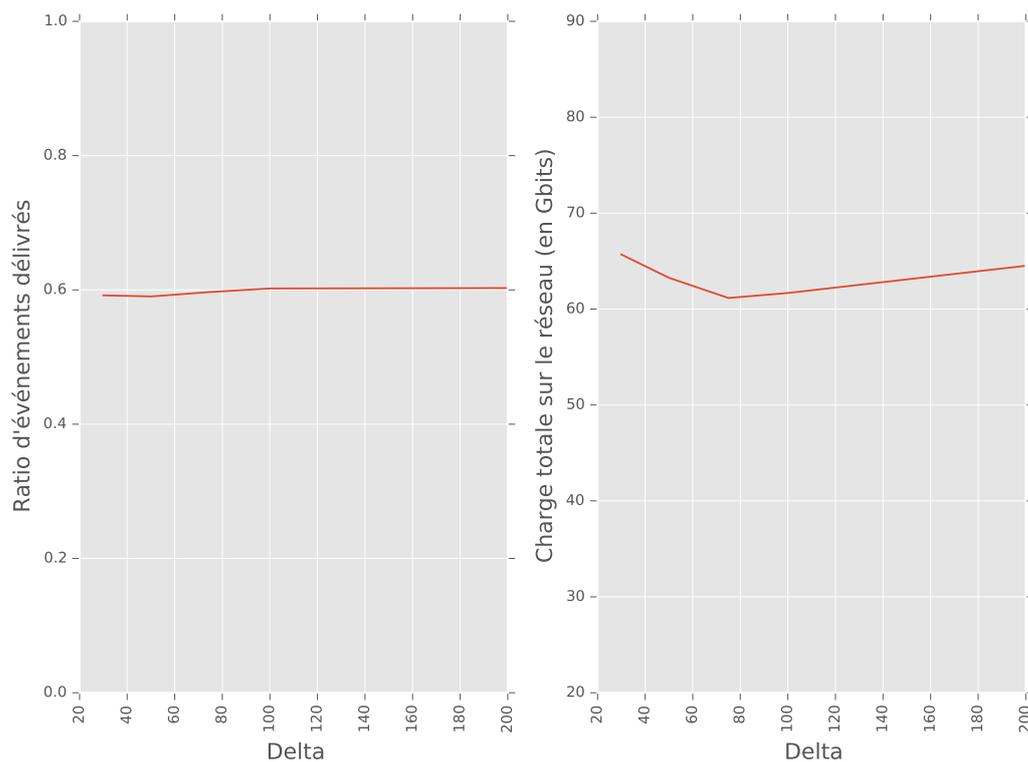


FIGURE 3.12 – Solution basée sur un routage géographique : résultats avec la stratégie utilisant la distance par rapport à la zone visée (25/12/2012)

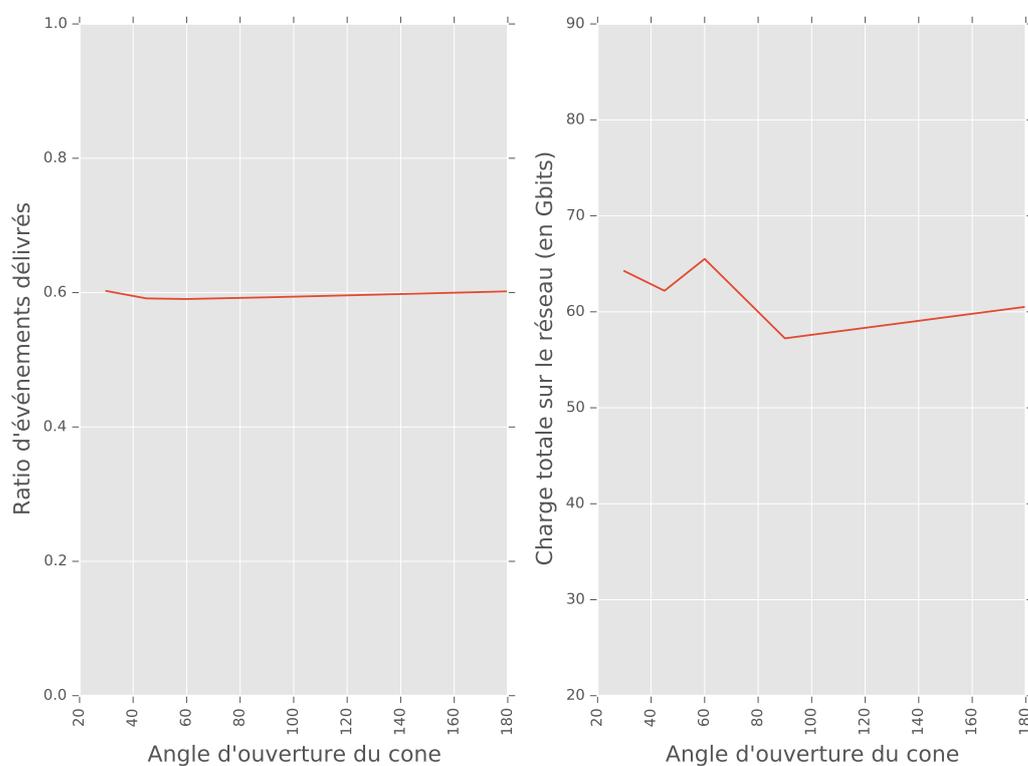


FIGURE 3.13 – Solution basée sur un routage géographique : résultats avec la stratégie utilisant un cône comme zone d'acheminement (25/12/2012)

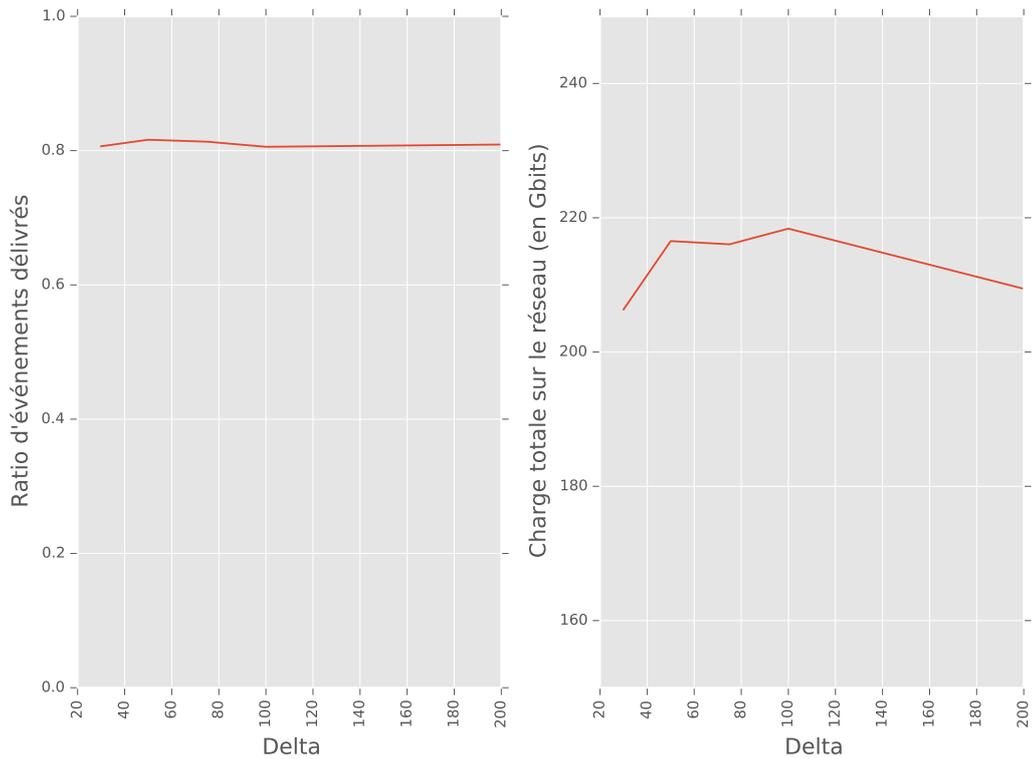


FIGURE 3.14 – Solution basée sur un routage géographique : résultats avec la stratégie utilisant la distance par rapport à la zone visée (28/06/2013)

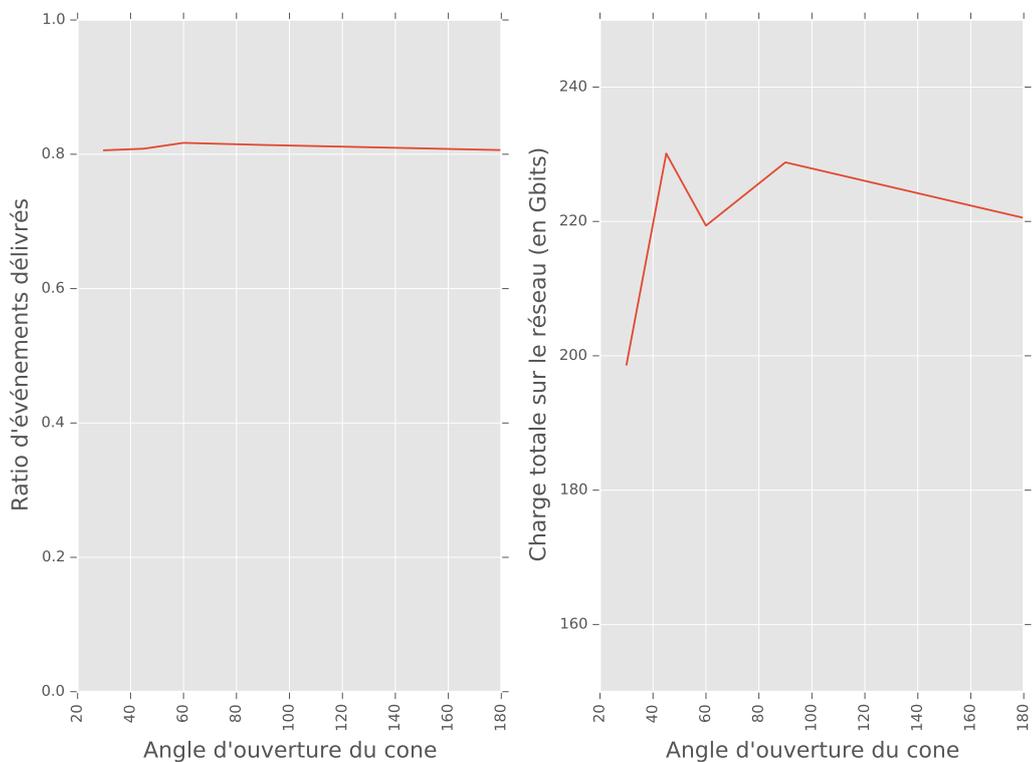


FIGURE 3.15 – Solution basée sur un routage géographique : résultats avec la stratégie utilisant un cône comme zone d'acheminement (28/06/2013)

Protocole de routage	AODV	Idéal
Ratio d'événements transmis pour le 25/12/2012	$59.9 \pm 0.4\%$	$59.1 \pm 0.7\%$

TABLEAU 3.6 – Résultats obtenus pour une retransmission des événements toutes les 60s

même quelque soit le protocole de routage utilisé. Cela signifie qu'AODV remplit correctement son rôle et qu'il n'y a pas d'optimisation possible sur cet aspect du système P/S.

3.4.7 Synthèse

Après avoir analysé les performances des trois systèmes P/S étudiés dans ce chapitre, nous pouvons conclure que celui offrant les meilleures performances est la solution la plus simple qui consiste à diffuser les événements à tous les nœuds du réseau. Ce résultat s'explique par plusieurs raisons.

- Comme indiqué dans le paragraphe 3.4.3, il y a beaucoup plus d'abonnements générés que d'événements. Cela signifie, qu'en terme de charge sur le réseau, il est coûteux de diffuser les abonnements sur une large zone, ce que font les systèmes P/S basés sur du routage géographique ou du routage de proximité.
- L'application modélisant la communication d'une compagnie vers sa flotte ne s'appuie pas sur le contexte géographique puisqu'on cherche à joindre des avions dans tout le réseau. Par conséquent, les systèmes P/S basés sur du routage géographique ou du routage de proximité ne peuvent pas utiliser ce contexte géographique pour restreindre la diffusion des messages. Il en résulte une charge très importante sur le réseau.

Pour confirmer ce deuxième point, des simulations ont été lancées avec uniquement l'application météo. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 3.7 et 3.8. Nous constatons que la solution basée sur le routage de proximité offre des résultats proches de l'heuristique simple. La solution utilisant du routage géographique permet de réduire significativement la charge induite sur le réseau mais avec une baisse du ratio d'événements délivrés. Par conséquent, bien que meilleurs que pour le cas plus complet, les résultats obtenus montrent que les deux solutions testées n'offrent pas d'amélioration significative par rapport à la solution diffusant les événements sur tout le réseau.

Système P/S	heuristique simple	Routage géographique	Routage de proximité
Ratio d'événements transmis	$92.1 \pm 1.6\%$	$73.1 \pm 2.1\%$	$88.7 \pm 1.4\%$
Charge totale sur le réseau (en Gbits)	3.3 ± 0.07	1.48 ± 0.05	3.0 ± 0.05

TABLEAU 3.7 – Résultats obtenus avec uniquement l'application météo pour la journée du 25/12/2012

Système P/S	heuristique simple	Routage géographique	Routage de proximité
Ratio d'événements transmis	$97.0 \pm 0.6\%$	$76.3 \pm 0.1\%$	$94.8 \pm 1.1\%$
Charge totale sur le réseau (en Gbits)	9.67 ± 0.09	4.74 ± 0.01	7.27 ± 0.91

TABLEAU 3.8 – Résultats obtenus avec uniquement l'application météo pour la journée du 28/06/2013

3.5 Conclusion

Ce chapitre a étudié les performances de certains systèmes P/S issus de l'état de l'art du chapitre précédent dans un contexte AANET. Afin de pouvoir réaliser cette étude, de nombreux choix techniques ont dû être faits. Il a fallu tout d'abord choisir la stratégie pour tester ces solutions. Nous nous sommes tournés vers la simulation avec l'utilisation d'Omnet++. Ensuite, nous avons modélisé un AANET. Cette modélisation s'est traduit

- par la définition de l'architecture des nœuds composant cet AANET avec un certains nombres de choix dimensionnants, notamment au niveau de la couche physique que nous avons choisi de simplifier afin de se concentrer sur les systèmes P/S ;
- par la réalisation d'un module de mobilité s'appuyant sur des traces réelles d'avion extraites de fichiers fournis par Eurocontrol ;
- par la modélisation de deux applications utiles à certains acteurs du monde aéronautique et orientées diffusion, pour lesquelles l'emploi d'un service P/S permettrait de rationaliser l'utilisation du réseau.

Une fois la modélisation de l'AANET présentée, ce chapitre a détaillé une étude de performance pour trois systèmes P/S. Le premier est basé sur une diffusion systématique des événements vers tous les nœuds du réseau. Le second se base sur l'utilisation d'un routage géographique, pour lequel nous avons choisi d'utiliser LBM. Enfin, le dernier se base sur la diffusion "à proximité" des événements et des abonnements. Les performances obtenues nous montrent que les solutions basées sur du routage géographique ou de proximité ne sont pas totalement adaptés aux AANET puisque qu'une heuristique simple qui se contente de diffuser les événements sur tous le réseau offre de meilleures performances. Ce problème d'efficacité est beaucoup plus prononcé pour l'application modélisant la communication d'une compagnie aérienne vers tous les avions de sa flotte, du fait de la répartition des nœuds intéressés par ces messages (non concentrés en une région géographique limitée).

Nous pouvons conclure qu'il est nécessaire de trouver une nouvelle approche pour mettre en œuvre une architecture P/S plus efficace sur un AANET. C'est l'objectif du prochain chapitre qui présente la contribution majeure de cette thèse.

Chapitre 4

Proposition d'un système P/S adapté aux AANETs

Sommaire

4.1	Présentation de la solution proposée	69
4.1.1	Algorithme de regroupement des nœuds	69
4.1.2	Le système P/S	71
4.2	Définition d'un nouvel algorithme de regroupement	72
4.2.1	Etat de l'art	72
4.2.2	Proposition d'un nouveau algorithme : CAPS	78
4.2.3	Etude de CAPS	82
4.2.4	Synthèse	88
4.3	Etude du nouveau système P/S	88
4.3.1	Principes de fonctionnement du système P/S	89
4.3.2	Implémentation sous Omnet++	92
4.3.3	Etude des performances	93
4.3.4	Les paramètres constants	93
4.4	Conclusion	98

Le chapitre précédent conclut sur la nécessité de définir une nouvelle architecture P/S mieux adaptée aux AANETs que les solutions testées précédemment. C'est l'objectif de ce chapitre qui introduit la solution proposée dans cette thèse : un système P/S s'appuyant sur une surcouche construite à l'aide d'un algorithme de regroupement de nœuds. Afin de comprendre le fonctionnement de ce système et d'évaluer les performances obtenues sur un AANET, ce chapitre est organisé en quatre sections. La première donne une description générale de l'architecture P/S proposée dans ce chapitre afin de mettre en avant l'originalité de l'approche proposée. La section suivante se concentre ensuite sur les algorithmes de regroupement, avec un état de l'art sur les solutions existantes pour les réseaux ad hoc mobiles puis la description de l'algorithme proposé dans cette thèse, dont l'objectif est de maximiser la stabilité de la structure sur un AANET. Les performances de ce nouvel algorithme sont alors étudiées, en le comparant à des solutions existantes. La troisième partie de ce chapitre détaille le système P/S proposé et modélisé, en analysant son comportement dans un AANET relativement aux solutions étudiées dans le chapitre précédent. La dernière section conclut ce chapitre.

4.1 Présentation de la solution proposée

L'objectif de cette section est de faire une présentation générale de la solution originale proposée pour mettre en œuvre un service P/S dans un AANET. Pour cela, nous commençons par introduire le concept de regroupement de nœuds (*clusterization* en anglais) qui servira de surcouche. Puis, nous présentons le système P/S en lui-même.

4.1.1 Algorithme de regroupement des nœuds

Le regroupement de nœuds consiste à organiser les nœuds en groupes virtuels (nous parlons de *cluster* en anglais). Les règles pour la formation de ces groupes sont liées aux objectifs recherchés. La plupart du temps, nous cherchons à créer des groupes de nœuds proches, mais pour certaines applications d'autres critères peuvent être utilisés. Par exemple, l'architecture P/S introduite au paragraphe 2.3.2.3 utilise un algorithme de regroupement de nœuds visant à limiter le nombre de groupes multicast à utiliser mais dans ce cas les groupes sont construits par affinité et non par proximité. Néanmoins, dans ce chapitre, nous resterons sur les algorithmes de regroupement basés sur la proximité des nœuds puisque c'est ce type de regroupement que nous recherchons pour la construction de notre architecture P/S, comme le montre la section 4.1.2 décrivant le principe de ce système P/S.

Dans un groupe, on retrouve généralement trois types de nœuds comme le montre la figure 4.1.

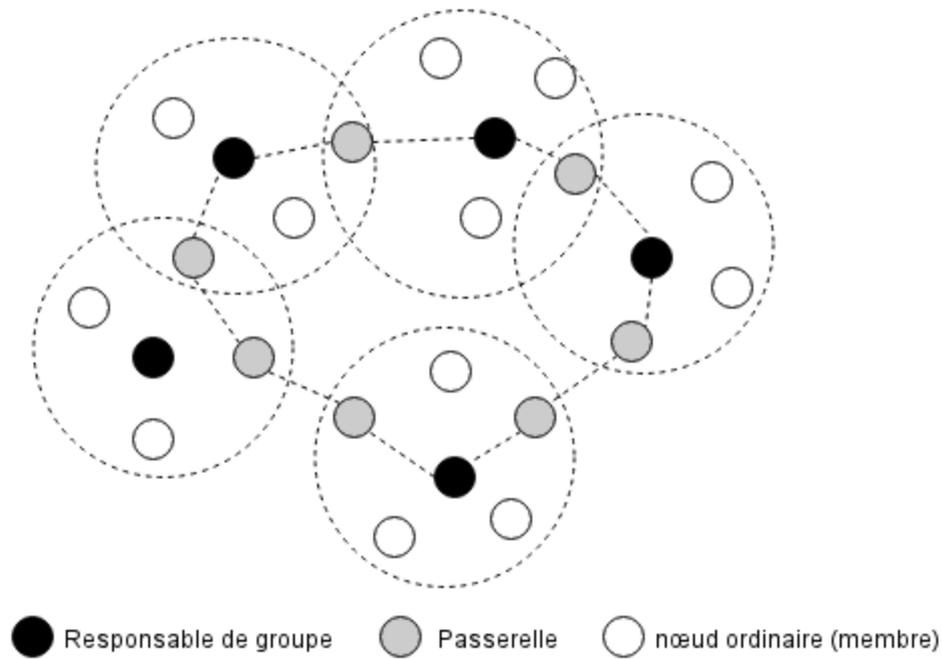


FIGURE 4.1 – Illustration des différents rôles dans un groupe

- Le responsable du groupe (cluster-head en anglais), en charge de la gestion du groupe. Il n’y en a qu’un par groupe.
- Les passerelles qui sont capable de joindre des nœuds situés dans des groupes voisins.
- Les nœuds restants qui sont simplement membre du groupe.

Dans les MANETs, les algorithmes de regroupement ont été majoritairement développés pour améliorer l’efficacité du routage dynamique par la construction d’une structure hiérarchique. En effet, comme le montre [HXG02] ou [GK00], les protocoles de routage classique de type réactif ou proactif ne permettent généralement pas le passage à l’échelle, dû à leurs caractéristiques intrinsèques. L’existence d’une architecture hiérarchique permet de différencier le comportement du protocole entre les communications inter-groupe et intra-groupe. Un exemple de protocole de routage serait une solution hybride s’appuyant sur une approche pro-active au sein d’un groupe et sur une approche réactive pour l’acheminement des messages entre deux groupes. C’est sur la base de cette idée que nous avons développée notre système P/S décrit ci-après en 4.1.2.

Néanmoins, cette technique possède des inconvénients. En effet, construire et maintenir des groupes demande un coût supplémentaire comparé à un réseau plat. D’après les travaux de [YC05], plusieurs coûts pour la création d’une structure hiérarchique sont importants à maîtriser.

- Le premier est la ressource utilisée pour constituer et maintenir les groupes. En effet, un réseau ad hoc mobile implique une topologie changeante avec le déplacement des nœuds et donc la nécessité de faire évoluer les groupes en conséquence.

- Certaines solutions peuvent provoquer une reconstruction en cascade de tous les groupes suite à un changement de topologie localisé. Ce phénomène dégrade les performances du protocole s'appuyant sur la structure et doit donc être évité.
- La phase de formation des groupes est une phase de collecte d'informations et de prise de décision du rôle à jouer par chaque nœud. La durée de cette phase, souvent mesurée en nombre de tours, est une métrique importante. En effet, tant que la structure n'est pas construite, le protocole de niveau supérieur ne peut pas fonctionner. Il faut donc limiter le temps nécessaire pour cette phase.

4.1.2 Le système P/S

Le système P/S proposé dans cette thèse pour les AANETs s'appuie sur une structure hiérarchique construite à l'aide d'un algorithme de regroupement. Nous repartons donc du concept de système P/S s'appuyant sur une surcouche décrit dans le chapitre 2. Dans notre architecture, les responsables de groupe jouent le rôle de "courtier". Ils collectent les événements et les abonnements des membres de leur groupe et transmettent les événements générés à l'extérieur du groupe aux nœuds, au sein de son groupe, intéressés par le contenu.

Un autre choix fait pour la conception de ce système P/S est de s'appuyer sur la couche réseau (présentée dans la section 3.1.2) et notamment sa capacité à offrir des services de routage unicast et multicast aux couches supérieures. Ainsi, par exemple, lorsqu'un responsable de groupe veut envoyer un message à tous les responsables de groupe, il indique en destinataire une adresse IP multicast sur laquelle tous les responsables de groupe sont abonnés. La couche réseau, et notamment le protocole de routage multicast, est ensuite chargée de transmettre ce message aux nœuds abonnés. Partant de ce principe, deux approches sont disponibles dans l'architecture P/S que nous proposons.

1. Une approche orientée "événement" où les abonnements sont envoyés au seul responsable de son groupe et les événements sont transmis à tous les responsables de groupe.
2. Une approche orientée "abonnement" où au contraire, les événements restent au sein des groupes et ce sont les abonnements qui sont transmis à tous les responsables de groupe.

La figure 4.2 illustre l'approche orientée "abonnement".

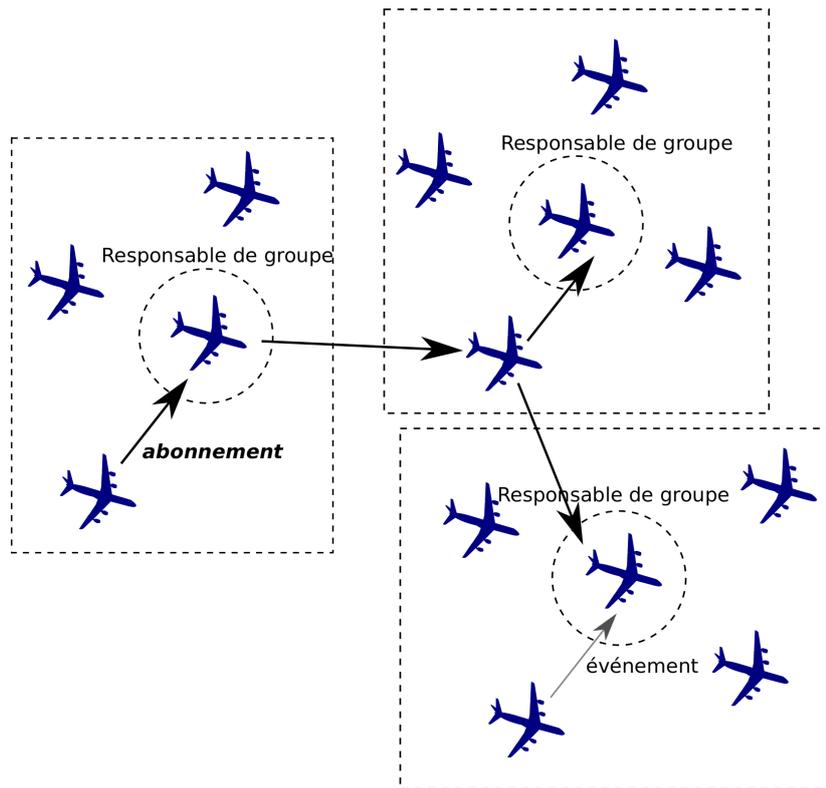


FIGURE 4.2 – Principe du système P/S dans le cas de la diffusion des abonnements

4.2 Définition d'un nouvel algorithme de regroupement

Afin de mettre en œuvre l'architecture P/S introduite dans le chapitre précédent, il est nécessaire de définir un algorithme de regroupement des nœuds efficace sur un AANET. C'est l'objectif de cette section. Pour l'atteindre, nous commençons par présenter un état de l'art des solutions existantes pour les MANET et VANET. Ensuite, nous introduisons l'algorithme de regroupement Clustering Algorithm for Publish / Subscribe (CAPS), notre contribution pour offrir une structure stable sur laquelle peut s'appuyer le système P/S proposé.

4.2.1 Etat de l'art

Plusieurs états de l'art sur les algorithmes de regroupement pour les MANET ont déjà été rédigés, comme [YC05] qui propose une classification intéressante des solutions existantes. Dans cet article, plusieurs critères sont utilisés pour différencier les algorithmes. Deux critères ont retenu notre attention. Le premier est la distance entre deux nœuds d'un même groupe. On distingue les algorithmes à un 1-saut de ceux à plusieurs sauts. Le second est l'objectif principal recherché par l'algorithme. [YC05] en liste six :

- la construction d'un ensemble dominant connecté (dans le sens d'un graphe

connecté) permettant de réduire le nombre de nœuds participant au processus de routage ;

- la minimisation du coût lié à la maintenance des groupes ;
- la prise en compte de la mobilité des nœuds pour la construction et la maintenance des groupes ;
- la minimisation de l'énergie consommée pour la construction et la maintenance des groupes ;
- la recherche de groupes de taille optimale ;
- l'utilisation d'une métrique combinée, c'est à dire utilisant plusieurs critères pour définir le responsable d'un groupe.

Sur la base de cette classification et de l'application visée, nous nous sommes concentrés sur :

- les solutions à 1-saut. Elles sont majoritaires dans la littérature car elles offrent un bon compromis entre la taille des groupes et la charge supplémentaire induite sur le réseau pour la constitution et le maintien des groupes (la majorité des algorithmes se base uniquement sur un envoi périodique de messages HELLO aux voisins, messages pouvant potentiellement être mutualisés avec ceux d'un protocole de routage par exemple) ;
- les solutions dont l'objectif principal est cohérent avec l'application utilisant la structure résultante (un système P/S dans notre cas) et le réseau mobile servant de support (un AANET), à savoir celle minimisant le coût lié à la maintenance, prenant en compte la mobilité des nœuds, recherchant une taille optimale ou utilisant une métrique combinée.

De plus, cet état de l'art débute par la présentation des deux premiers algorithmes de regroupement proposés par la communauté scientifique, Lowest ID Clustering (LIC) et Highest Connectivity Clustering (HCC) qui ont servi de point de départ à de nombreuses solutions présentées dans cette section. Enfin, il se conclut par une section décrivant les algorithmes pensés spécifiquement pour les VANETs dont les caractéristiques sont proches des AANET.

4.2.1.1 Introduction de LIC et HCC

LIC [EWB87] fut une des premières propositions d'algorithme de regroupement. Dans cette solution, chaque nœud se déclare responsable d'un groupe ou non en fonction de son identifiant et de celui de ses voisins. Au démarrage, tous les nœuds ont un statut "non défini" et débute l'émission de messages périodiques de type HELLO (sur le même principe que les protocoles de routage dynamique tel que OSPF) contenant son statut et son identifiant. La formation des groupes suit alors les règles suivantes :

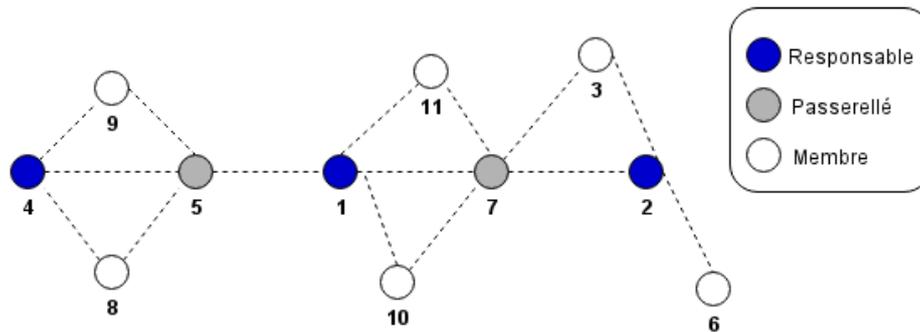


FIGURE 4.3 – Exemple de formation de groupes avec LIC

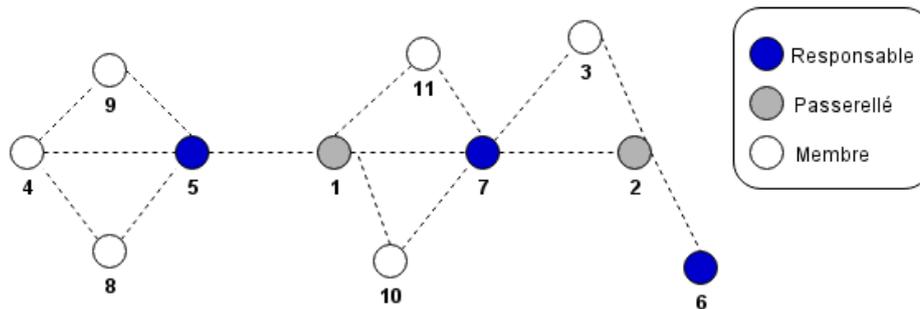


FIGURE 4.4 – Exemple de formation de groupes avec HCC

1. le nœud possédant le plus petit identifiant dans son voisinage à un saut se déclarera comme responsable et ses voisins à un saut qui n'ont pas encore de statut deviennent membres de ce groupe ;
2. dans le cas contraire, il attend que tous ses voisins ayant un plus petit identifiant prennent un statut. Deux cas se présentent, soit un de ces nœuds devient responsable de groupe alors il se rattache à ce groupe, soit aucun d'eux ne devient responsable et dans ce cas il devient lui-même responsable de groupe ;
3. enfin, si un nœud est voisin de deux responsables de groupe, il devient passerelle.

La figure 4.3 donne un exemple de groupes obtenus avec LIC.

HCC [GT95] est une évolution de LIC, prenant en compte la connectivité des nœuds pour l'élection des responsables de groupe. Cette solution propose deux changements par rapport à LIC.

- Les messages "HELLO" envoyés par les nœuds contiennent une information supplémentaire : le nombre de voisins.
- Cette information est utilisée pour déterminer les responsables de groupe. HCC privilégie les nœuds avec le plus de voisins.

La figure 4.4 donne un exemple de groupes obtenus avec HCC.

4.2.1.2 Solutions cherchant à minimiser le coût lié à la maintenance

Une des premières propositions cherchant à minimiser les modifications de groupes fut Least Cluster Change (LCC) [CWL97], évolution des protocoles LIC et HCC.

En effet, ces deux algorithmes modifient périodiquement la structure et provoquent ainsi des changements en cascade. Par exemple, si un responsable de groupe arrive à proximité d'un nœud considéré par l'algorithme comme "meilleur", alors ce responsable abandonne son rôle au profit de ce voisin. Au contraire, LCC privilégie le maintient en place des responsables de groupe. Pour atteindre cet objectif, cet algorithme se décompose en deux phases. La première phase permet la formation initiale des groupes. Elle est identique à LIC, c'est-à-dire que les nœuds ayant le plus petit identifiant dans leur voisinage sont élus responsables de groupe. La deuxième phase est spécifique à LCC. Il s'agit d'une phase de maintenance des groupes permettant la création ou la disparition d'un responsable de groupe pour uniquement deux cas :

- si deux responsables de groupe se retrouvent voisins, alors l'un d'eux devra abandonner son rôle de responsable de groupe ;
- si un nœud membre d'un groupe se déplace et n'est plus à portée de son responsable alors soit il rejoint un autre groupe dans la mesure du possible, soit il crée un nouveau groupe dont il devient responsable.

Une approche plus récente recherchant également à minimiser la restructuration est α -SSCA (Stability Structure Clustering Algorithm) [GeAK11]. Comme LCC, cet algorithme se décompose en deux phases : la construction des groupes puis leur maintenance.

- L'élection initiale des responsables de groupe se base sur un "score" qui correspond au nombre de voisins ayant un statut indéfini. L'utilisation de cette métrique permet un éloignement maximum des responsables de groupe.
- Pour la phase de maintenance, un critère est utilisé pour autoriser la fusion de deux groupes lorsque deux responsables se croisent. Il s'agit du facteur de stabilité qui, pour deux responsables u et v se définit comme le rapport entre le nombre de membres de u qui sont aussi voisins de v et le nombre total de membres du groupe de u . Alors, u renonce à son rôle s'il est voisin de v et si

$$\frac{|\{X_i \in Cl(u)/X_i \in N(v)\}|}{|Cl(u)|} \geq \alpha$$

où $N(v)$ correspond à l'ensemble des voisins de v et $Cl(u)$ représente l'ensemble des nœuds appartenant au groupe dont u est le responsable. α est un paramètre de l'algorithme qui permet de piloter la stabilité de la structure.

4.2.1.3 Solutions utilisant la mobilité des nœuds

MOBIC [BKL01], une évolution de l'algorithme LCC, fut la première solution à prendre en compte la mobilité des nœuds. L'hypothèse à l'origine de cette approche est de penser que le nœud le plus à même d'être responsable d'un groupe est celui qui a la mobilité relative avec ses voisins la plus faible. Pour la mise en œuvre, MOBIC

introduit une nouvelle métrique. Pour deux nœuds X et Y , si $M_Y^{rel}(X)$ correspond à la mobilité relative calculée par Y vis à vis de son voisin X , alors

$$M_Y^{rel}(X) = 10 \log_{10} \left(\frac{RxPr_{X \rightarrow Y}^{new}}{RxPr_{X \rightarrow Y}^{old}} \right)$$

avec $RxPr_{X \rightarrow Y}$ correspondant à la puissance du signal de X reçu par Y . Le score d'un nœud Y , noté M_Y et utilisé dans le processus d'élection des responsables de groupe, correspond alors à la variance de l'ensemble des mobilités relatives $M_Y^{rel}(X_i)$, où X_i est un voisin de Y .

Pour la maintenance des groupes, MOBIC suit la même logique que LCC. La seule différence est l'introduction d'un compteur, nommé CCI, utilisé pour éviter de fusionner deux groupes lorsque les deux responsables se retrouvent voisins sur une courte durée. Concrètement, cela signifie que lorsque deux responsables de groupes se retrouvent voisins, l'un des deux doit abandonner son rôle uniquement après que le compteur CCI a expiré.

4.2.1.4 Solutions recherchant une taille de groupe optimale

Les solutions entrant dans cette catégorie font l'hypothèse qu'il y a un nombre optimal de membres pour un groupe. Un groupe constitué d'un nombre de nœud trop élevé peut induire une charge importante du responsable du groupe. De l'autre coté, un groupe trop restreint conduit à un trop grand nombre de groupes, ce qui diminue l'efficacité de la structure hiérarchique.

Un exemple d'algorithme entrant dans cette catégorie est Degree-Load-Balancing Clustering (DLBC) [AP00]. Cette solution effectue périodiquement une reconstruction des groupes afin de maintenir la taille des groupes autour d'une valeur définie dans l'algorithme comme optimale. Lorsque la différence entre cette valeur de référence et la taille d'un groupe excède *Max_Delta* (paramètre de l'algorithme), le responsable de ce groupe abandonne son rôle afin de forcer la définition de nouveaux groupes. Cette approche, bien que permettant de maintenir la taille des groupes proche d'une valeur souhaitée, implique de nombreux changements de structure dû au mouvement des nœuds et par conséquent n'est pas adaptée lorsque la stabilité est un objectif majeur.

4.2.1.5 Solutions s'appuyant sur une métrique combinée

Plutôt que d'utiliser une seule métrique pour choisir les responsables de groupe, certains algorithmes en combinent plusieurs pour calculer le score d'un nœud. L'intérêt est de pouvoir construire une structure offrant un compromis entre plusieurs objectifs recherchés (dans un réseau de capteurs par exemple, nous pouvons chercher à construire une structure stable tout en essayant d'optimiser la gestion de l'énergie). Weighted

Clustering Algorithm (WCA) [CDT02] est un exemple entrant dans cette catégorie. Il utilise une somme pondérée de quatre métriques dans le calcul du score d'un nœud u . Ces métriques sont :

- la différence de degré $D(u)$ correspondant à la différence entre le degré de u (c'est à dire son nombre de voisins) et une valeur M qui représente le nombre de nœuds qu'un responsable de groupe peut servir ;
- la somme des distances avec ses voisins $P(u)$ partant de l'hypothèse que chaque nœud connaît sa position (grâce à l'utilisation d'un récepteur GPS par exemple) ;
- la mobilité relative moyenne $M(u)$, identique à celle proposée dans MOBIC ;
- le temps de service en tant que responsable de groupe $T(u)$.

Nous avons alors :

$$Poids(u) = \alpha.D(u) + \beta.P(u) + \gamma.M(u) + \delta.T(u)$$

avec $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$ Le nœud ayant le plus petit score dans son voisinage devient responsable de groupe.

4.2.1.6 Solutions spécifiques aux VANET

Comme pour l'état de l'art sur les systèmes P/S, nous nous sommes également intéressés aux solutions spécifiquement développées pour les VANETs. [SK14] présente un état de l'art détaillé dans ce domaine, classifiant les solutions en plusieurs catégories :

- celles utilisant du regroupement prédictif. Dans ce cas, la position géographiques des nœuds, ainsi que leur comportement futur, sont utilisés pour la construction des groupes ;
- celles s'appuyant sur la couche MAC pour la construction des groupes ;
- celles proposant des groupes à plusieurs sauts ;
- celles reprenant des approches utilisées pour les MANET (appelée solution "traditionnelle" dans l'article).

Nous voyons tout de suite que certaines catégories ne sont pas pertinentes pour les AANET, notamment celles s'appuyant sur la couche MAC (les couches MAC envisagées pour les AANET sont différentes de celles utilisées pour les VANET). De même les solutions basées sur le comportement prédictif des trajectoires sont difficilement exploitables car elles utilisent par exemple le concept de carrefour pour faire des choix de regroupement ce qui est difficilement transposable dans un AANET.

Finalement, la seule catégorie offrant des algorithmes à 1 saut potentiellement intéressants pour les AANETs est celle regroupant les solutions traditionnelles. Dans cette catégorie, il y a notamment plusieurs solutions cherchant à améliorer le concept introduit par MOBIC, c'est à dire l'utilisation de la mobilité relative entre les nœuds

pour construire des groupes stables. Par exemple, l’algorithme décrit dans [MK12] introduit le concept de force relative entre deux nœuds, dépendant de la distance entre eux et de leur vitesse respective. Le calcul de cette force est inspiré de la loi de Coulomb et est utilisé dans la constitution des groupes. Une autre solution intéressante est Stability-Based Clustering Algorithm (SBCA) [AH12]. Dans cet algorithme, l’élection des responsables de groupe est basée sur une valeur de mérite combinant la différence de vitesse entre les nœuds et le nombre de voisins. Une spécificité de cette solution est l’élection d’un responsable de groupe secondaire servant de secours en cas de problème sur le responsable principal.

4.2.2 Proposition d’un nouveau algorithme : CAPS

Ce paragraphe détaille l’algorithme de regroupement à 1 saut que nous proposons, CAPS. En vue de l’application visée, à savoir la construction d’un système P/S au dessus, deux caractéristiques principales ont été recherchées :

1. la première, la plus importante, est la stabilité des groupes. Ce choix est justifié par le coût d’une restructuration pour le système P/S utilisant la structure comme surcouche. En effet, le changement de responsable de groupe implique une phase de synchronisation au sein du groupe (pour récupérer les abonnements/événements des membres du groupe) mais également avec les groupes voisins. Cette synchronisation étant coûteuse en termes de débit, Il est important de limiter les cas où elle est nécessaire ;
2. la seconde est de contenir le nombre de groupes. Un trop grand nombre de groupes implique une perte d’efficacité pour le système P/S puisque les informations devant être transmises à tous les responsables de groupe devront être envoyées à plus de nœuds.

Pour atteindre ces objectifs, CAPS reprend un principe de fonctionnement répandu pour les algorithmes de regroupement à 1-saut, à savoir :

- chaque nœud envoie des messages réguliers à ses voisins contenant les informations utiles à l’algorithme ;
- sur la base des informations reçues, un processus de constitution des groupes et d’élection des responsables de groupes est lancé ;
- en suivant la même logique que LCC, la phase initiale de construction des groupes est suivie par une phase de maintenance qui permet de faire évoluer la structure de manière locale suivant l’évolution de la topologie du réseau.

Ces trois phases sont détaillées dans la suite de cette section. Enfin il est important de noter que CAPS implémente le concept de passerelle bien qu’il ne soit pas utilisé par le système P/S. Cela permet d’avoir un algorithme de regroupement fonctionnement

équivalent à la plupart des solutions existantes, et par conséquent utilisable dans une autre application que celle développée dans cette thèse.

4.2.2.1 Détection du voisinage

Pour prendre sa décision, chaque nœud du réseau doit connaître son voisinage. Pour cela, un message de type HELLO est envoyé périodiquement par chaque nœud à ses voisins. Ce message contient :

- un score dépendant de différents critères (détaillés dans le paragraphe suivant) et qui est utilisé pour l'élection des responsables de groupe ;
- le statut du nœud vis à vis de l'algorithme de regroupement (non-défini, membre, passerelle ou responsable) ;
- la liste de ses voisins ;
- sa position ;
- sa vitesse (sous la forme d'un vecteur pour donner également la direction) ;
- son identifiant (unique sur tout le réseau) ;
- l'identifiant du responsable du groupe auquel le nœud est rattaché (égale à une valeur par défaut s'il est dans le statut non-défini).

L'échange périodique de ces messages permet également de détecter la perte de lien entre voisins directs. En effet, chaque nœud associe un minuteur à chaque voisin direct. Ce minuteur est fixé à une valeur supérieure à deux fois la période d'envoi des messages HELLO. Si le minuteur expire avant la réception d'un nouveau message de la part du voisin auquel il est associé, le nœud peut alors considérer que le lien avec ce voisin est rompu. Suivant les cas, une procédure de maintenance peut alors être lancée.

4.2.2.2 Formation des groupes

Au lancement, tous les nœuds ont un statut non-défini et débutent l'envoi des messages "HELLO" périodiques. Après une période configurée par défaut à trois fois l'intervalle entre les messages périodiques, les nœuds cherchent à prendre un état définitif (responsable, membre ou passerelle). Ce choix se base sur un score prenant en compte deux critères : le nombre de voisins et la vitesse relative par rapport aux voisins.

L'objectif du premier critère, noté D_{coef} dans la suite, est de privilégier une taille optimale pour les groupes (comme les solutions présentées dans la section 4.2.1.4). Ce

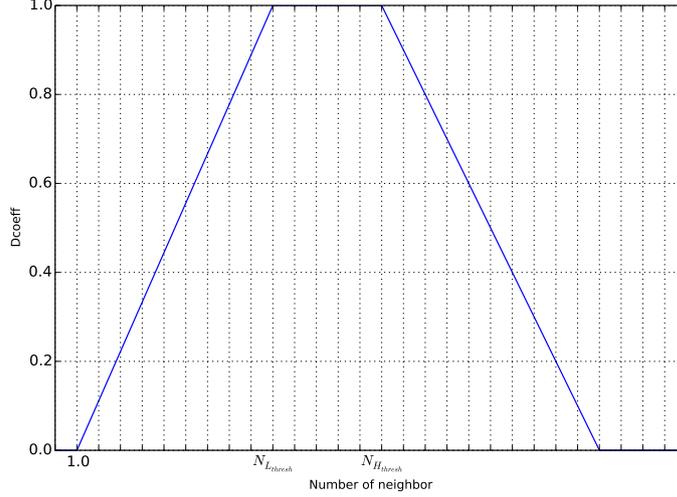


FIGURE 4.5 – Calcul de coefficient D_{coeff} (avec $N_{Lthresh} = 10$ et $N_{Hthresh} = 15$)

coefficient est calculé de la manière suivante :

$$D_{coeff} = \begin{cases} 0 & \text{if } N < 1 \\ \frac{N-1}{N_{Lthresh}-1} & \text{if } 1 \leq N \leq N_{Lthresh} \\ 1 & \text{if } N_{Lthresh} < N \leq N_{Hthresh} \\ 1 + \frac{N_{Hthresh}-N}{N_{Lthresh}} & \text{if } N_{Hthresh} < N \end{cases} \quad (4.1)$$

$N_{Lthresh}$ et $N_{Hthresh}$ sont deux paramètres de l'algorithme permettant de configurer la taille privilégiée des groupes. La figure 4.5 donne une représentation graphique de ce coefficient pour $N_{Lthresh} = 10$ et $N_{Hthresh} = 15$.

Le deuxième critère utilisé, noté V_{coeff} , utilise la vitesse relative par rapport à ces voisins. Nous reprenons l'idée introduite par MOBIC (décrite à la section 4.2.1.3), à savoir que le choix de responsables de groupe ayant une mobilité relative faible avec les membres du groupe permet d'augmenter la stabilité de la structure. Par contre, dans CAPS, nous utilisons le vecteur vitesse transmis dans les messages "HELLO" pour mesurer cette mobilité relative. Soit u un nœud, nous notons \vec{v}_u son vecteur vitesse, \hat{v}_u ce vecteur vitesse normalisé et $N(u)$ l'ensemble des voisins de u . Le coefficient V_{coeff} est alors calculé de la manière suivante :

$$V_{coeff} = \frac{\sum_{v \in N(u)} \hat{v}_u \cdot \hat{v}_v}{|N(u)|}$$

Le score, noté S , utilisé dans le processus d'élection des responsables de groupe, est alors défini de la manière suivante :

$$S = \gamma D_{coeff} + \beta V_{coeff}$$

α et β sont deux paramètres de l'algorithme respectant la contrainte suivante : $\gamma + \beta = 1$.

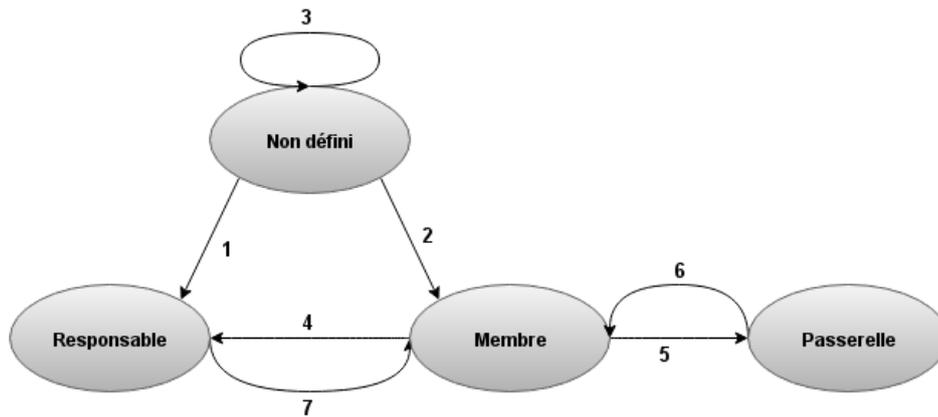


FIGURE 4.6 – Machine à état de l’algorithme CAPS

Une fois ce score calculé, chaque nœud peut lancer le processus permettant la formation des groupes. La figure 4.6 présente la machine à état définissant le principe de CAPS pour cette formation. Les changements d’état sont basés sur les transitions suivantes.

1. Cette transition correspond à la création d’un nouveau groupe. Si un nœud possède le plus haut score dans son voisinage, il crée un nouveau groupe en se déclarant *responsable* de ce groupe. Cette création se traduit par la mise à jour des messages HELLO qu’il transmet à ses voisins.
2. La deuxième transition représente le cas d’un nœud dont un de ses voisins est déjà *responsable* de groupe. Dans ce cas, ce nœud rejoint le groupe et passe à l’état *membre*.
3. Dans le cas d’un nœud qui a au moins un voisin en statut non-défini et ayant un meilleur score, il ne peut pas se décider. Il reste donc en statut *non défini*.
4. La transition de l’état *membre* à celui de *responsable* de groupe ne peut se produire que dans un cas : lorsque le *responsable* de groupe est injoignable et qu’aucun des autres voisins n’est responsable. Dans ce cas, un nouveau groupe, dont le nœud considéré devient *responsable*, est créé.
5. Un nœud devient *passerelle* lorsqu’apparaît dans son voisinage un *responsable* de groupe (autre que celui gérant son groupe d’appartenance).
6. Inversement, un nœud passe de *passerelle* à simple *membre* lorsqu’il ne peut plus rejoindre aucun responsable de groupe différent du sien.
7. Le passage de *responsable* à simple *membre* se produit lors de la fusion de deux groupes. Dans CAPS, cette fusion est conditionnée par plusieurs critères afin d’augmenter la stabilité de l’algorithme. Ils sont détaillés dans la section suivante.

4.2.2.3 Maintenance des groupes

Comme cela a été introduit au début de cette section, un des objectifs principaux de CAPS est d’offrir une structure hiérarchique maximisant la stabilité. La procédure de maintenance des groupes est par conséquent très importante, puisqu’il faut éviter de fusionner des groupes qui seraient séparés peu de temps après. Ainsi, pour que deux groupes soient fusionnés, deux conditions doivent être remplies. La première est basée sur la trajectoire des avions. Afin d’augmenter la stabilité de l’algorithme, deux groupes ne seront fusionnés que si les responsables de groupe ont des directions proches. Les vecteurs vitesse ont été utilisés pour traduire cette condition. Ainsi, si u et v sont deux responsables de groupe, \vec{v}_u et \vec{v}_v leur vecteur vitesse respectif, ces deux groupes sont fusionnés uniquement si :

$$\vec{v}_u \cdot \vec{v}_v > 0$$

La seconde condition à respecter est reprise de l’algorithme α -SSCA introduit dans l’état de l’art. Cela signifie que u abandonne son rôle si :

$$\frac{|\{X_i \in Cl(u) / X_i \in N(v)\}|}{|Cl(u)|} \geq \alpha$$

où $N(v)$ correspond à l’ensemble des voisins de v et $Cl(u)$ représente l’ensemble des nœuds appartenant au groupe dont u est le responsable.

4.2.3 Etude de CAPS

L’étude de CAPS s’est faite en trois étapes. Nous avons tout d’abord validé son implémentation sous Omnet++ sur des scénarios simples, puis nous avons évalué les performances dans le cadre de l’AANET modélisé au chapitre précédent. Durant cette seconde étape, nous avons également cherché à optimiser les différents paramètres de CAPS. Enfin nous avons comparé son efficacité à celle de solutions existantes, introduites précédemment dans l’état de l’art. Ces étapes sont détaillées dans la suite de cette section.

4.2.3.1 Evaluation sur des scénarios simples

Afin de valider notre implémentation, plusieurs scénarios simples ont été définis. L’objectif de ces scénarios est d’être capable d’analyser le comportement de CAPS dans des cas où nous connaissons le résultat attendu. Cela permet de détecter les erreurs que nous aurions pu faire dans l’implémentation plus facilement que sur un AANET où le comportement de CAPS est difficilement prévisible a priori. La figure 4.7 présente un exemple de scénario qui nous a permis de valider notre algorithme. Plus précisément, ce scénario a testé :

- la formation initiale des groupes et l’élection des responsables. Dans cet exemple,

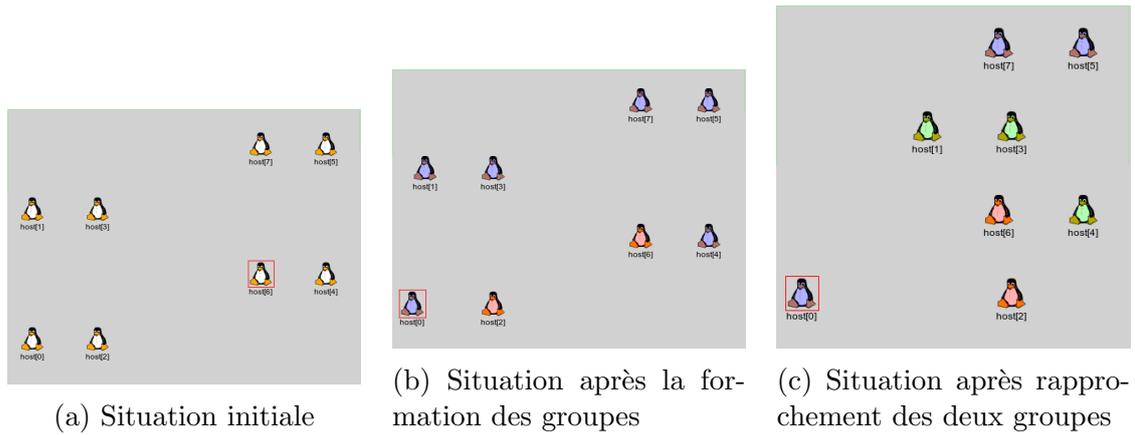


FIGURE 4.7 – Exemple de scénario simple utilisé pour valider CAPS

dans le groupe de gauche, le nœud 0 a une trajectoire différente des autres (il part en sens opposé). Nous vérifions que lors de la phase de formation des groupes, il n'est pas choisi comme responsable ;

- la procédure de maintenance qui dans ce cas précis ne doit pas fusionner les groupes puisque que les deux responsables ont des trajectoires opposées.

4.2.3.2 Evaluation dans un contexte AANET

Une fois l'implémentation de CAPS validée sur des scénarios simples, nous avons validé son comportement et ces performances sur un AANET. Pour cela, nous sommes repartis du travail de modélisation détaillé dans le chapitre précédent. Le tableau 4.1 présente la configuration utilisée pour toutes les simulations présentées dans ce paragraphe.

Durée de la simulation	24h
Jours simulés	25/12/2012 et 28/06/2013
Options de la couche physique	
Portée	350 km
Débit de la couche physique	1 Mb/s
Options liées à CAPS	
Périodicités des messages HELLO	2s

TABLEAU 4.1 – Paramètres communs à toutes les simulations pour CAPS

Les journées de trafic rejouées et les propriétés de la couche physique sont identiques à celles utilisées dans le chapitre précédent. Pour CAPS, l'intervalle entre les messages HELLO a été fixé à 2 secondes. Dans ce contexte, deux paramètres ont été particulièrement étudiés : le coefficient D_{coeff} et le seuil α . Les résultats obtenus sont présentés dans la suite de cette section.

Influence du coefficient D_{coeff} Le premier critère dont l'influence a été étudiée est le coefficient D_{coeff} . Il est utilisé dans la métrique permettant l'élection du

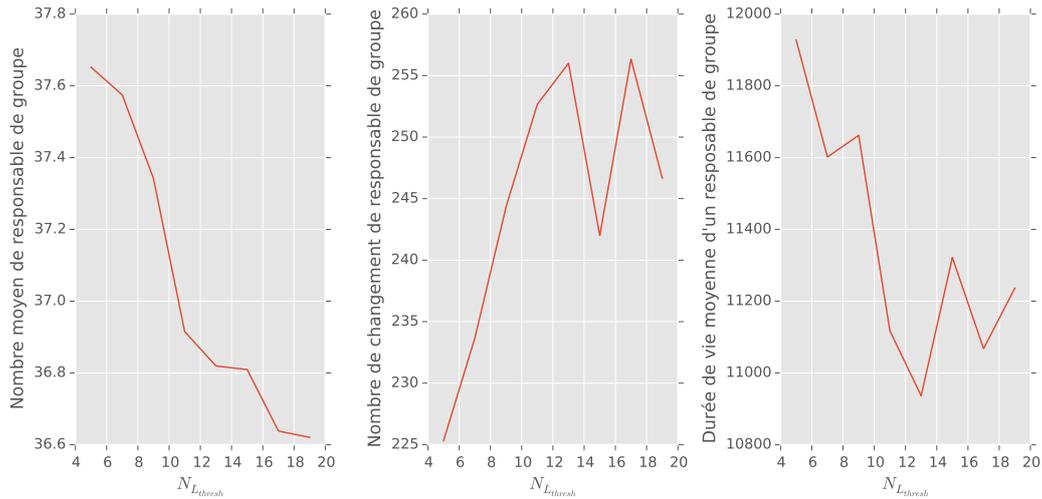


FIGURE 4.8 – performances de CAPS suivant le paramètre $N_{Lthresh}$ pour la journée du 25 décembre 2012

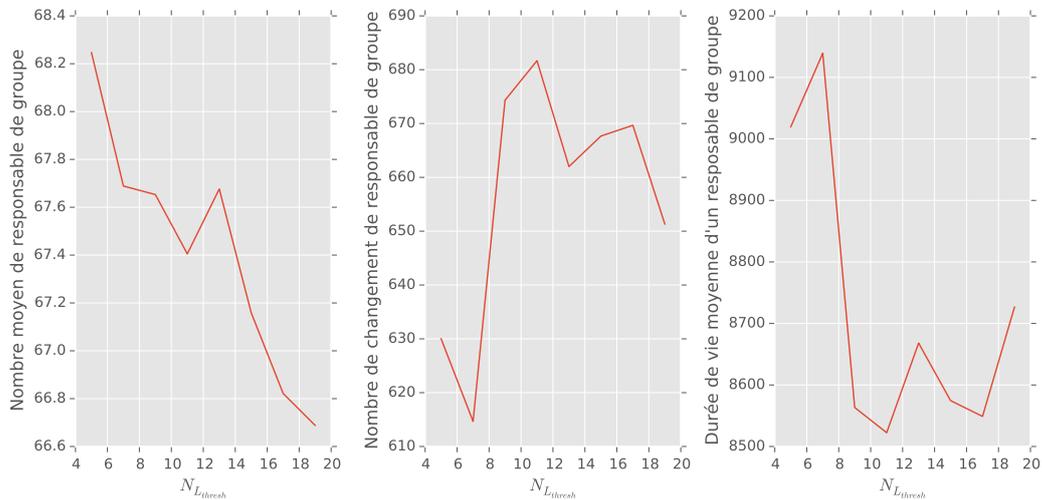


FIGURE 4.9 – performances de CAPS suivant le paramètre $N_{Lthresh}$ pour la journée du 28 juin 2013

responsable d'un groupe. Les figures 4.8 et 4.9 présentent les performances de CAPS suivant la valeur du seuil $N_{Lthresh}$. Pour ces simulations, la valeur de $N_{Hthresh}$ a été fixée à $N_{Lthresh} + 5$.

Nous observons que les meilleurs résultats en termes de stabilité sont obtenus pour des valeurs assez faible de $N_{Lthresh}$, exactement 5 pour la journée du 25/12/2012 et 7 pour la journée du 28/06/2013. La différence entre les deux journées s'explique par la densité d'avions différente et par conséquent le fait que chaque avion a plus de voisins en moyenne pour la journée du 28/06/2013.

Néanmoins ces résultats sont à nuancer avec les propriétés de la couche physique que nous utilisons dans nos simulations. En effet, l'objectif de ce coefficient est de privilégier comme responsable de groupe des nœuds ayant un nombre optimal de voisins pour limiter la charge du responsable, ainsi que les interférences inhérentes à des nombreuses

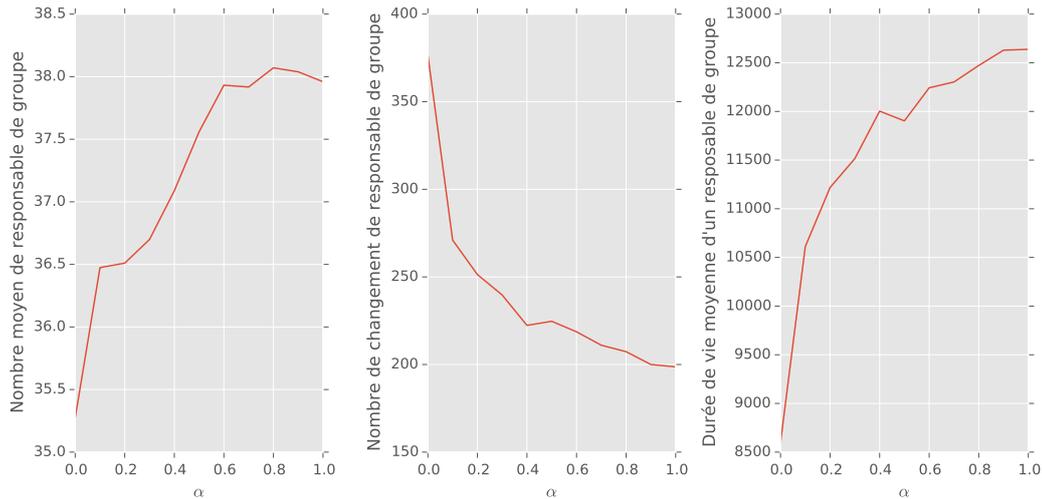


FIGURE 4.10 – performances de CAPS suivant le seuil α pour la journée du 25 décembre 2012

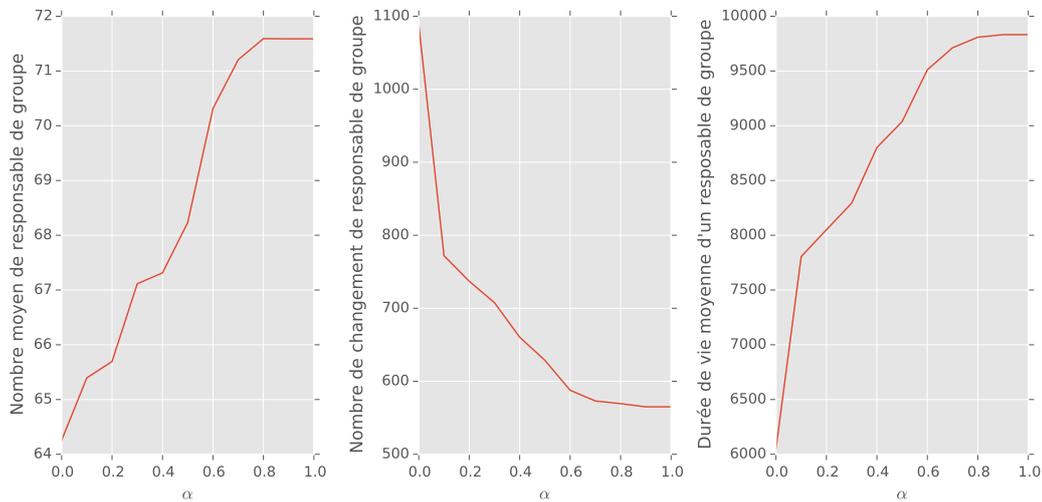


FIGURE 4.11 – performances de CAPS suivant le seuil α pour la journée du 28 juin 2013

communications dans un espace restreint. Or, avec une couche physique idéale, il est difficile d'évaluer le gain apporté par ce coefficient. Dans les futurs travaux, il sera important d'évaluer l'influence de ce critère avec une couche physique plus réaliste.

Influence du seuil α L'influence du seuil α , utilisé dans le processus de décision pour la fusion de deux groupes, a également été étudiée. Les figures 4.10 et 4.11 présentent les résultats obtenus pour nos deux journées de trafic, servant de référence. Pour ces simulations, $N_{L_{thresh}}$ a été fixé à 5 et $N_{H_{thresh}}$ a été fixé à 10.

Nous observons que ce seuil α a une influence sur la stabilité de CAPS puisque le nombre de changement de responsable de groupe peut être doublé suivant la valeur de α . Pour être plus précis, la stabilité de CAPS augmente avec l'accroissement d' α , avec en contre partie une légère augmentation du nombre de groupes dans le réseau. Ce comportement s'explique par l'utilisation faite de ce seuil. Comme présenté précé-

demment, deux conditions sont nécessaires et suffisantes pour fusionner deux groupes. L'une, reprise de l'algorithme α -SSCA, exige que les deux responsables de groupe aient un nombre minimum de voisins commun. Plus α est grand, plus le nombre de voisins commun requis pour fusionner est important, ce qui implique moins de fusions de groupe et donc un algorithme plus stable.

Une autre information intéressante peut être déduite de l'allure générale des courbes. Nous observons une cassure (à partir de $\alpha = 0.4$ pour la journée du 25/12/2015 et de $\alpha = 0.6$ pour la journée du 28/06/2015). A partir de ce point, le gain en stabilité est moindre. Par conséquent, une valeur α fixée à 0.5 permet d'offrir un compromis intéressant.

4.2.3.3 Comparaison à des solutions existantes

Enfin, afin d'évaluer la pertinence de CAPS, nous avons comparé ses performances dans un contexte AANET à des solutions existantes, présentées dans la section 4.2.1. Trois algorithmes ont ainsi été modélisés sous Omnet++ et comparés à CAPS : LCC, MOBIC et α -SSCA. Suite à l'étude de performance détaillée dans la section précédente, l'algorithme CAPS a été configuré de la manière suivante :

- $\alpha = 0.5$
- $N_{L_{thresh}} = 5$
- $N_{H_{thresh}} = 10$
- $\gamma = \beta = 0.5$

Les figures 4.12 et 4.13 présentent les résultats obtenus. Pour chaque journée de trafic rejouée, le graphique de gauche représente l'évolution du nombre de responsables de groupe durant la journée. Nous pouvons noter une corrélation avec les résultats du chapitre précédent montrant l'évolution du nombre d'avions en vol durant la journée. Celui de droite indique le nombre de changement de responsable de groupe. Enfin, celui du milieu nous montre la durée de vie des responsables de groupe sous forme d'une fonction de répartition (Cumulative Distribution Function (CDF)) afin de mieux faire ressortir les différences entre les solutions.

Nous observons que les objectifs visés par CAPS, à savoir offrir une structure maximisant la stabilité tout en contenant le nombre de groupe, sont atteints. En effet, CAPS permet la construction d'une structure plus stable, puisque il y a moins de changement de responsables de groupe et leur durée de vie est plus importante par rapport aux autres algorithmes. Les courbes semblent nous indiquer un gain significatif. Afin d'évaluer quantitativement ce gain, le tableau 4.2 montre les moyennes et les écarts type obtenus pour la journée du 28 juin 2013. Les premières conclusions issues des graphiques se confirment. Si nous prenons par exemple la durée de vie moyenne des responsables de groupe, CAPS augmente cette durée de vie d'environ 47% par rapport à SSCA et de plus de 50% par rapport à MOBIC.

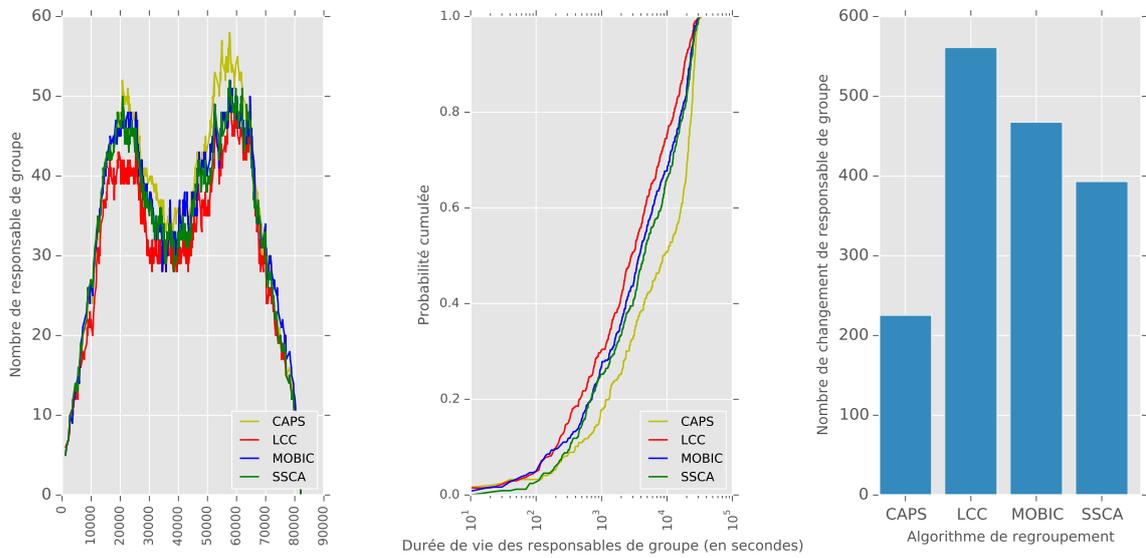


FIGURE 4.12 – Comparaison des algorithmes de regroupement pour la journée du 25/12/2012

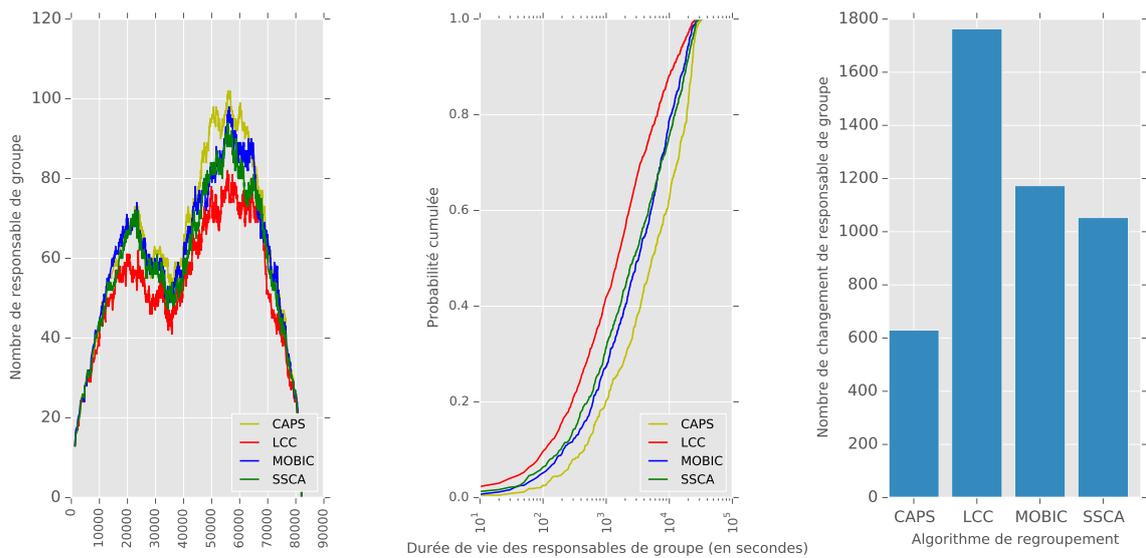


FIGURE 4.13 – Comparaison des algorithmes de regroupement pour la journée du 28/06/2013

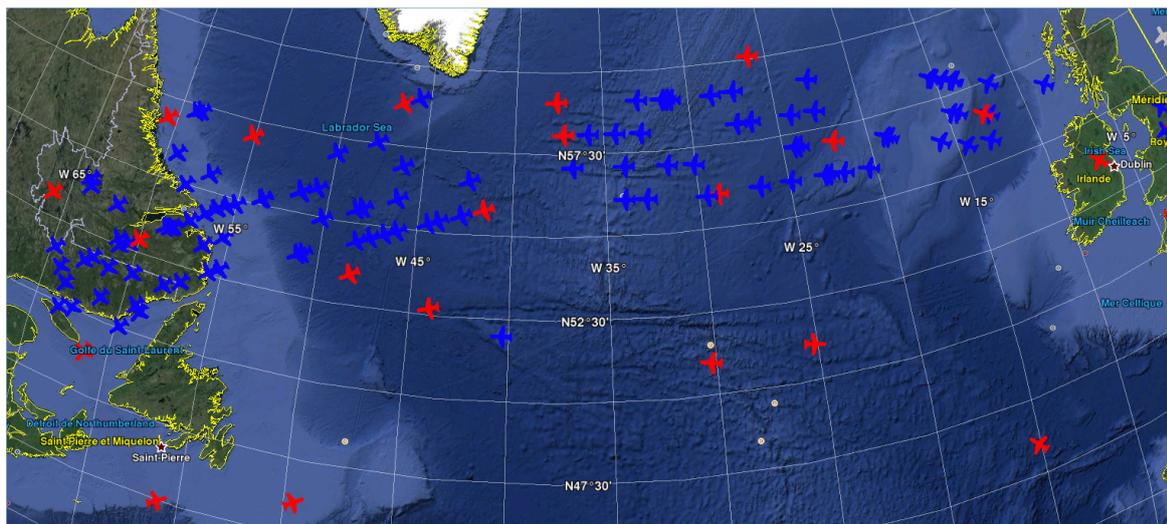


FIGURE 4.14 – Illustration de l’algorithme de regroupement CAPS pour la journée du 25/12/2012

Concernant le nombre de groupes, une plus grande stabilité implique souvent un nombre un peu plus important de groupe puisque nous évitons de fusionner des groupes dont la durée de vie serait courte pour augmenter la stabilité. Cela se vérifie pour CAPS. Néanmoins, nous constatons sur les graphiques que cette augmentation reste contenue. Quantitativement, nous voyons par exemple que le nombre moyen de responsable a augmenté de 6% par rapport à SSCA et de moins d’1% par rapport à MOBIC.

Algorithme	CAPS	MOBIC	SSCA	LCC
Nombre moyen de responsable	68.2 ± 0.1	67.9 ± 0.5	64.5 ± 0.5	59.5 ± 0.3
Nombre de changement de responsable	630 ± 0.5	1173 ± 30	1053 ± 9	1763 ± 44
Durée de vie moyenne des responsables	$9019 \pm 0.2s$	$5939 \pm 109s$	$6134 \pm 131s$	$3885 \pm 116s$

TABLEAU 4.2 – Résultats des algorithmes de regroupement pour la journée du 28 juin 2013

4.2.4 Synthèse

Cette section a permis de présenter une contribution majeure de cette thèse, à savoir la conception d’un algorithme de regroupement offrant de meilleures performances dans les AANET que les algorithmes généralement proposés dans les MANET. La structure obtenue à l’aide de CAPS est une base solide pour la construction d’une architecture P/S efficace dans le contexte d’un AANET. Enfin, pour conclure cette partie, la figure 4.14 affiche sous Google Earth© la structure obtenue avec CAPS au milieu de la journée du 25/12/2012 (les responsables de groupe sont en rouge).

4.3 Etude du nouveau système P/S

L’algorithme de regroupement CAPS ayant été détaillé, cette section se concentre maintenant sur l’étude du système P/S développé au dessus de la structure hiérarchique

construite par CAPS. Le principe de ce système a été introduit dans le paragraphe 4.1.2. Nous nous concentrons dans cette partie sur le détail de son fonctionnement, son implémentation sous Omnet++ et enfin l'étude de ses performances dans un contexte AANET, notamment vis à vis des systèmes P/S étudiés au chapitre précédent.

4.3.1 Principes de fonctionnement du système P/S

Comme cela a été vu auparavant, ce système P/S s'appuie sur les groupes pour optimiser la diffusion des événements et des abonnements. Les responsables de groupe jouent le rôle de *courtier* et le système s'appuie sur du routage unicast et multicast pour la diffusion des événements et des abonnements entre les groupes. Néanmoins, certains mécanismes supplémentaires sont nécessaires pour améliorer l'efficacité de ce système. Ils sont présentés dans cette section.

4.3.1.1 Approche orientée événement ou abonnement

Comme introduit à la section 4.1.2, deux stratégies peuvent être utilisées pour délivrer les événements aux nœuds : une approche orientée "événement" ou "abonnement" suivant les messages restants au sein d'un groupe et ceux transmis à tous les responsables de groupe. Le fonctionnement détaillé de ces deux stratégies est présenté dans la suite de cette section.

Principe de l'approche orientée événement Dans cette approche ce sont les événements qui sont distribués à tous les groupes. Précisément, le principe de fonctionnement est le suivant.

- Tous les membres d'un groupe transmettent leurs abonnements à leur responsable de groupe. Celui-ci les enregistre dans une table contenant l'identité de la source, l'identifiant (unique dans tous le réseau) de l'abonnement et les contraintes liées à cet abonnement.
- Lorsqu'un événement est généré, il est transmis à tous les responsables de groupe, à l'aide du service de routage multicast. Pour cela, un paquet IP contenant ce message est créé avec pour destination une adresse multicast sur laquelle tous les responsables de groupe sont abonnés.
- Pour chaque événement reçu, les responsables de groupe consultent leur table d'abonnements et si l'un d'eux correspond, cet événement est transmis aux membres du groupe.

Ce fonctionnement est illustré à la figure 4.15.

Principe de l'approche orientée abonnement Contrairement à l'approche précédemment détaillée, ce sont cette fois-ci les abonnements qui sont diffusés dans

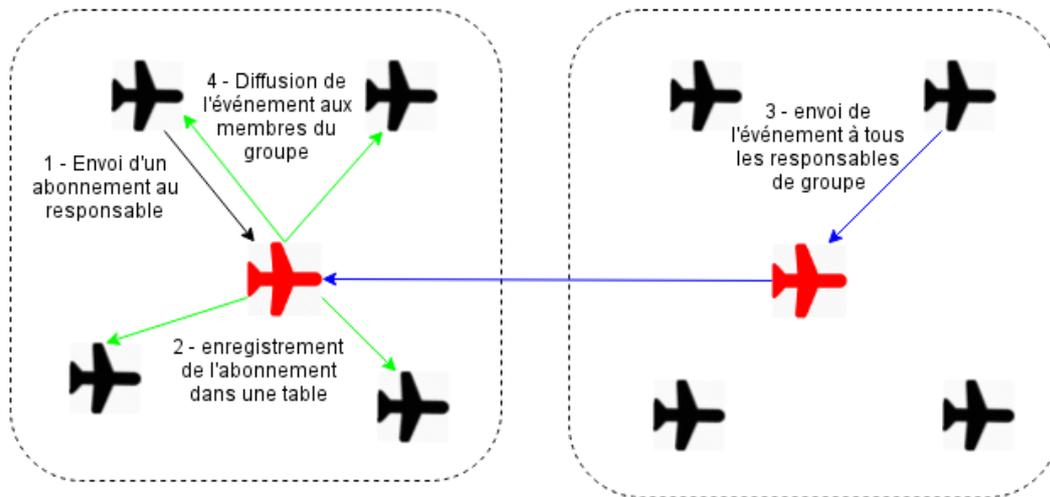


FIGURE 4.15 – Principe de l'approche orientée événement pour le système P/S

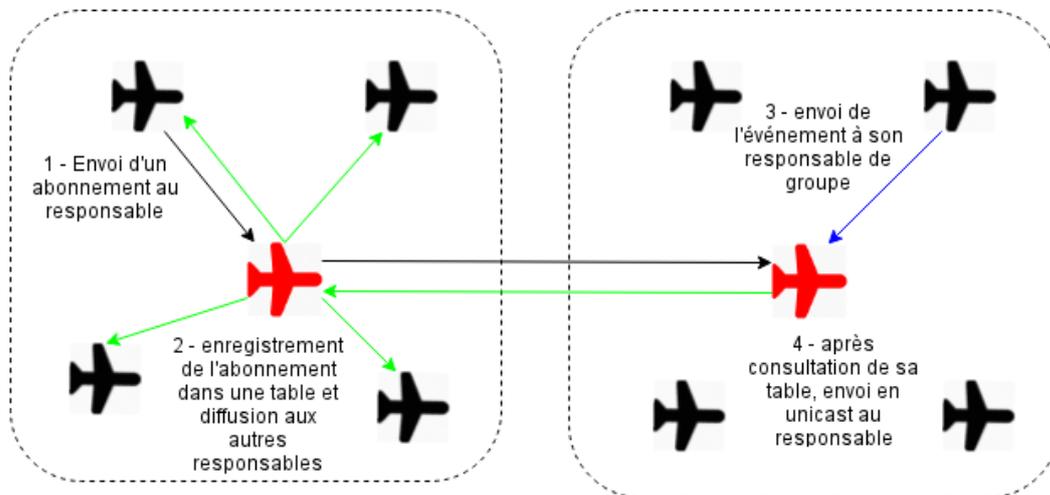


FIGURE 4.16 – Principe de l'approche orientée abonnement pour le système P/S

tout le réseau. Ce changement implique un principe de fonctionnement différent afin d'optimiser le cas où plusieurs nœuds d'un même groupe sont intéressés par le même événement. Le fonctionnement repose alors sur les points suivants.

- Tous les membres d'un groupe transmettent leurs événements à leur responsable de groupe. Celui-ci les enregistre dans une table.
- Il en est de même pour les abonnements. Ils sont transmis au responsable de groupe qui les enregistre dans une table. Par contre, après leur enregistrement, ils sont transmis à tous les autres responsables de groupe en multicast. L'adresse IP source indiquée dans le paquet est celle du responsable de groupe.
- Lorsqu'un responsable reçoit un abonnement provenant d'un autre groupe, il consulte sa table d'événements. Si l'un d'eux correspond, il est transmis au responsable ayant transmis l'abonnement qui le diffuse ensuite aux membres de son groupe.

Ce fonctionnement est illustré à la figure 4.16.

Adaptation de la stratégie à l'application Le choix d'une approche par rapport à l'autre va potentiellement influencer l'efficacité du système en termes de trafic généré sur le réseau et de ratio d'événements transmis. Intuitivement, nous pouvons penser que la meilleure stratégie à utiliser dépend de l'application utilisant le service P/S. Pour une application générant plus d'événements que d'abonnements (en termes de volume de données), il semble plus intéressant que les événements restent au sein du groupe et que les abonnements soient transmis à tous les responsables de groupe (stratégie de type "abonnement"). Dans le cas contraire (plus d'abonnements générés que d'événements), c'est l'autre stratégie qui minimise la charge induite sur le réseau (stratégie de type "abonnement").

Afin de maximiser l'efficacité du système P/S, notre proposition consiste à nous adapter aux besoins de l'application. Concrètement, cela se traduit par le fait que la stratégie utilisée est spécifiée par l'application lors de son enregistrement au service P/S. Cette information est ensuite sauvegardée par le système. Ainsi, lorsqu'une application envoie un abonnement ou un événement, le système connaît la stratégie à utiliser pour ce message.

4.3.1.2 Adaptation aux changements de structure

Les principes décrits précédemment fonctionnent très bien en régime établi, c'est à dire lorsque les groupes sont créés et stables. Or, une des caractéristiques principale des AANET est la dynamicité de la topologie, impliquant nécessairement des modifications de la structure maintenue par CAPS (même si l'algorithme cherche à les minimiser). Ces modifications doivent être prises en compte par le système P/S. Elles sont de trois types :

1. un nœud changeant de groupe ;
2. un nœud devenant responsable de groupe ;
3. au contraire un nœud quittant son rôle de responsable.

Ce sont surtout les deux premiers cas qui sont à traiter puisque le troisième peut être vu comme la succession des deux premiers. Le problème principal à traiter est la synchronisation d'un responsable (dans les sens mise à jour de ses tables d'abonnements et d'événements) vis à vis des nouveaux membres qui apparaissent dans son groupe ou des messages issues d'autres groupes qu'il n'a pas pu recevoir.

Ces modifications de groupes sont gérés par deux mécanismes spécifiques.

- Le premier permet de gérer la synchronisation au sein d'un groupe. Le principe est simple. Lorsqu'un nœud change de groupe, il réémet ses abonnements et ses événements actifs en direction du nouveau responsable de groupe qui peut ainsi mettre à jour ses tables d'abonnements et d'événements.
- Le second mécanisme permet de récupérer les informations disponibles dans les autres groupes (abonnements ou événements suivant l'application et donc la stra-

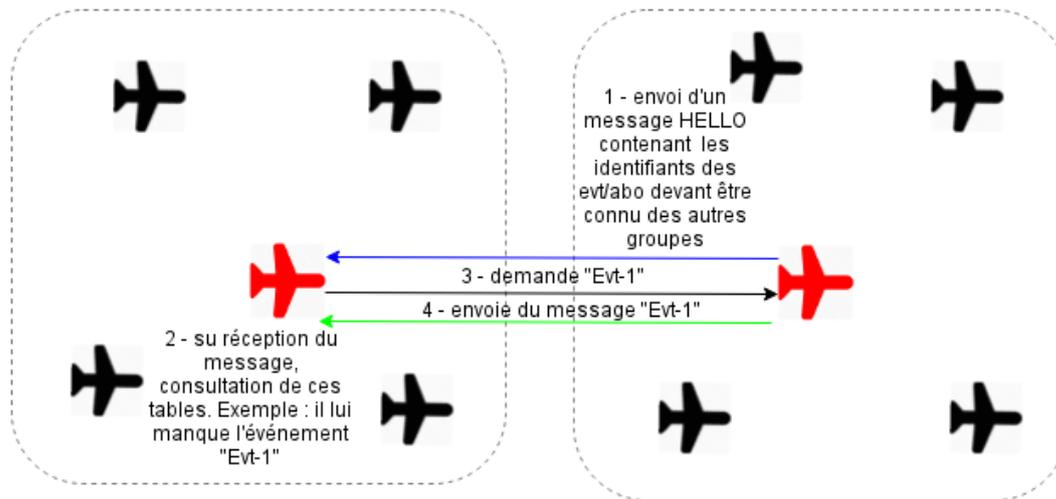


FIGURE 4.17 – Principe de la synchronisation entre responsables de groupe

tégie de diffusion utilisée). Il s'appuie sur un principe de messages, nommés SYNC par la suite, à portée variable émis périodiquement. Ces messages contiennent tous les identifiants des événements et des abonnements qui doivent être diffusés à l'extérieur du groupe. Il est à destination de tous les responsables de groupe (en utilisant l'adresse multicast les identifiant) et sa portée est pilotée par le Time To Live (TTL) du paquet. Sur réception d'un de ces messages, un responsable de groupe suit la procédure suivante. Il récupère la liste des événements et des abonnements détenus par la source du message SYNC. S'il lui manque des informations, il fait une demande en unicast à la source du message qui lui envoie (en unicast également) les informations qu'il lui manque. Une illustration de ce mécanisme est donnée à la figure 4.17. Le choix de la portée permet de rechercher un compromis entre la quantité de données générées sur le réseau et la rapidité pour synchroniser les responsables de groupe.

4.3.2 Implémentation sous Omnet++

Tous les mécanismes décrits dans la section précédente ont été implémentés sous Omnet++. Néanmoins, une partie de l'architecture des nœuds a été simplifiée. Il s'agit des protocoles de routage unicast et multicast. En effet, le système P/S proposé s'appuie sur ce routage pour la distribution des événements ou des abonnements en dehors d'un groupe. Afin de ne pas dépendre des résultats du protocole de routage et ainsi pouvoir évaluer les seuls mécanismes P/S, nous avons choisi de nous appuyer sur un module de routage "idéal" développé sous Omnet++ lors de cette thèse. Par idéal, nous entendons que chaque nœud a une connaissance de toute la topologie du réseau à chaque instant et peut ainsi choisir le meilleur chemin, s'il existe, pour diffuser le message vers la ou les destinations. Dans le cas où aucun chemin n'existe, le paquet est détruit.

4.3.3 Etude des performances

Le fonctionnement et l'implémentation du système P/S maintenant détaillé, cette section présente l'évaluation des performances menée sur ce système, en le comparant notamment aux systèmes étudiés dans le chapitre précédent.

4.3.4 Les paramètres constants

Afin d'avoir des résultats comparables, certains paramètres sont restés constants pour toutes les simulations présentées dans ce chapitre. Ils sont présentés dans le tableau 4.3.

Durée de la simulation	4h
Jours simulés	25/12/2012 et 28/06/2013
Options de la couche physique	
Portée	350 km
Débit de la couche physique	1 Mb/s
Options liées à l'application météo	
Durée d'un événement	uniform(1800s, 3600s)
Durée des abonnements	1h
Diamètre de la zone couverte par un événement	250km
Taille d'un message d'abonnement	2048 Octets
Taille d'un message de type événement	11192 Octets
Nombre d'événements simultanés	3
Options liées à l'application compagnie aérienne	
Durée d'un événement	uniform(400s, 800s)
Durée d'un abonnement	2h
Taille d'un message d'abonnement	2048 Octets
Taille d'un message de type événement	11192 Octets
Configuration de CAPS	
Périodicité des messages HELLO	4s

TABLEAU 4.3 – Paramètres communs à toutes les simulations

Ces paramètres sont très proches de ceux utilisés dans le chapitre précédent et introduit dans le paragraphe 3.4.1. Les légères différences (réduction du temps simulé, réduction du trafic applicatif) ont pour objectif de réduire la durée des simulations. Au niveau de la configuration de l'algorithme de regroupement CAPS, la périodicité des messages HELLO a été fixée à 4 secondes afin d'offrir un compromis entre la charge induite sur le réseau et la réactivité de la structure vis à vis des changements de topologie.

4.3.4.1 Evaluation de la synchronisation

Les premiers tests effectués sur le système P/S se sont concentrés sur le mécanisme de synchronisation. En effet, ses performances dépendent principalement de deux cri-

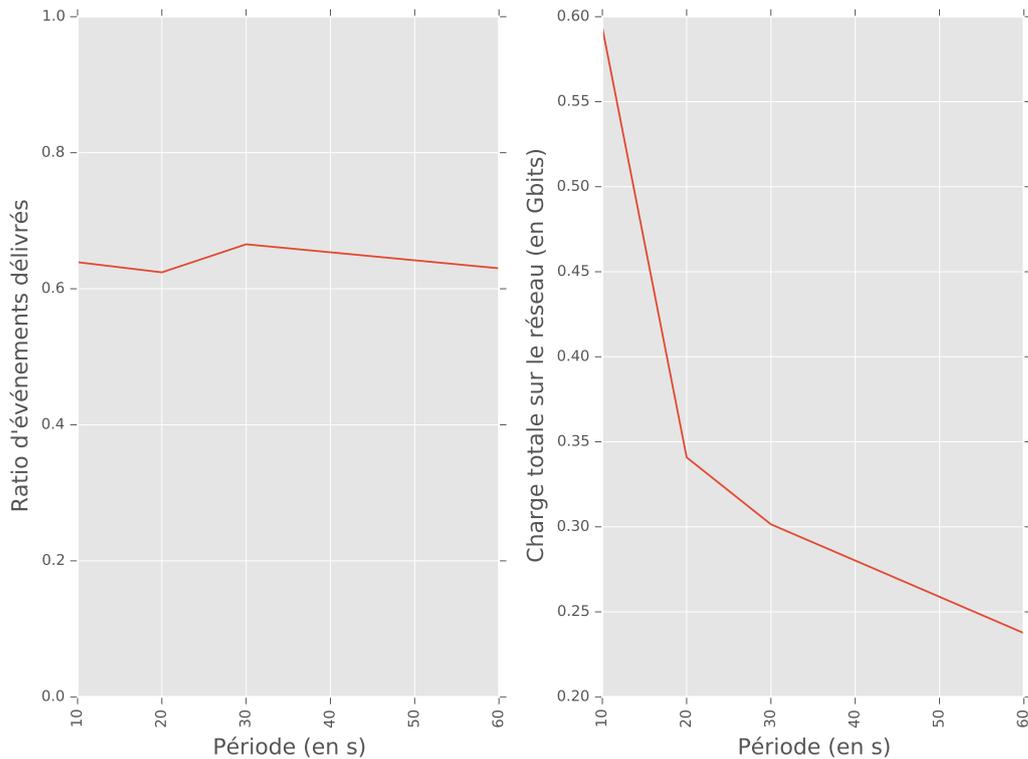


FIGURE 4.18 – Influence de la périodicité des messages SYNC (journée du 25/12/2012)

tères, la périodicité et la portée des messages SYNC. Les figures 4.18 et 4.19 montrent l'influence de la périodicité sur les performances du système.

Comme attendu, nous remarquons que plus l'intervalle entre les messages est important, plus la charge totale de données générées sur le réseau diminue. Par contre, cet intervalle n'a que peu d'influence sur le ratio d'événements délivrés, au moins pour les valeurs testées (entre 10 et 60 secondes). Ce résultat s'explique par la durée de vie moyenne des événements et des abonnements largement supérieure aux intervalles testés.

Concernant l'influence de la portée des messages, les figures 4.20 et 4.21 montrent les résultats obtenus suivant le TTL utilisé.

Logiquement, nous constatons qu'une augmentation du TTL entraîne une augmentation du ratio d'événement délivré mais également de la charge induite sur le réseau. Il est donc nécessaire de trouver un compromis. Pour la suite, nous avons décidé de fixer ce compromis à un TTL de 3. Ce choix se justifie par la volonté qu'un message SYNC soit reçu par tous les responsables des groupes voisins. Or, dans un algorithme de regroupement à 1-saut, il y a au maximum 3 sauts entre deux responsables de groupe.

4.3.4.2 Influence de la stratégie de diffusion

Après avoir étudié l'approche retenue pour gérer les modifications de la structure, ce paragraphe se concentre sur la stratégie de diffusion (détaillée au paragraphe 4.3.1.1).

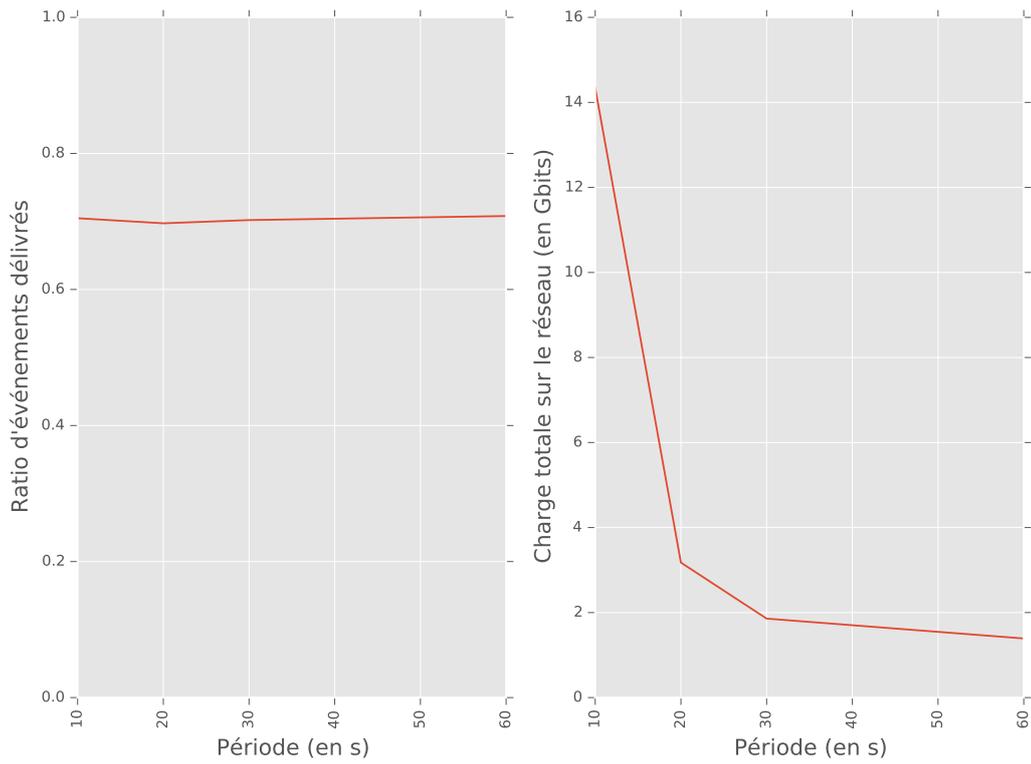


FIGURE 4.19 – Influence de la périodicité des messages SYNC (journée du 28/06/2013)

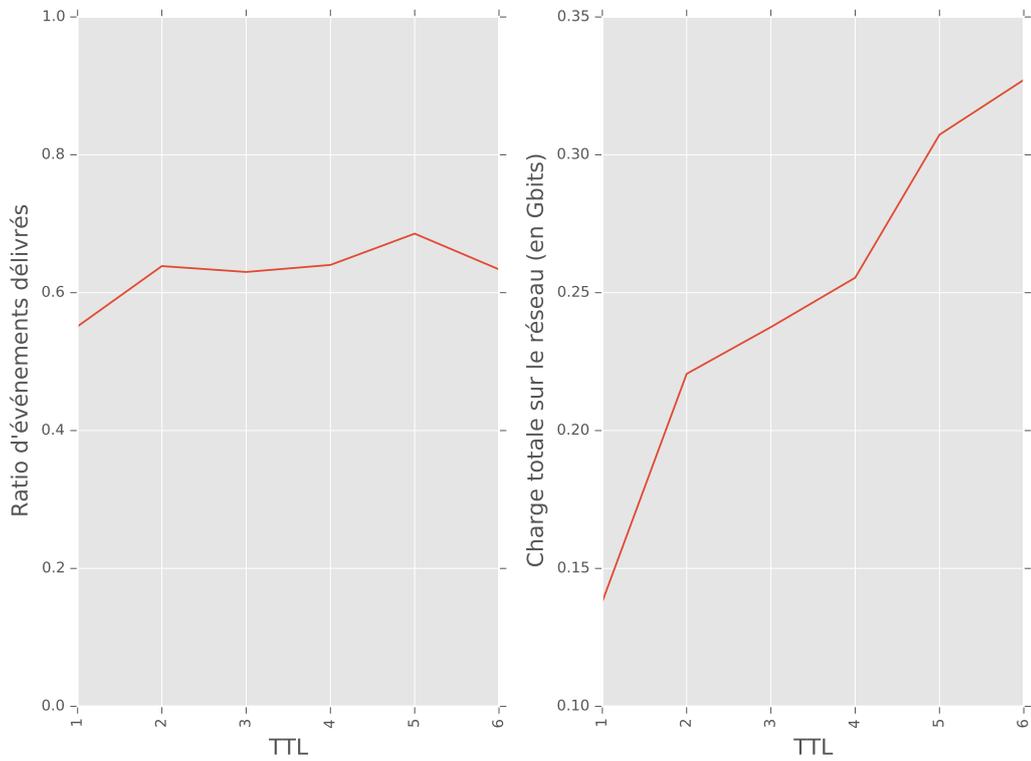


FIGURE 4.20 – Influence du TTL utilisé pour les messages SYNC (journée du 25/12/2012)

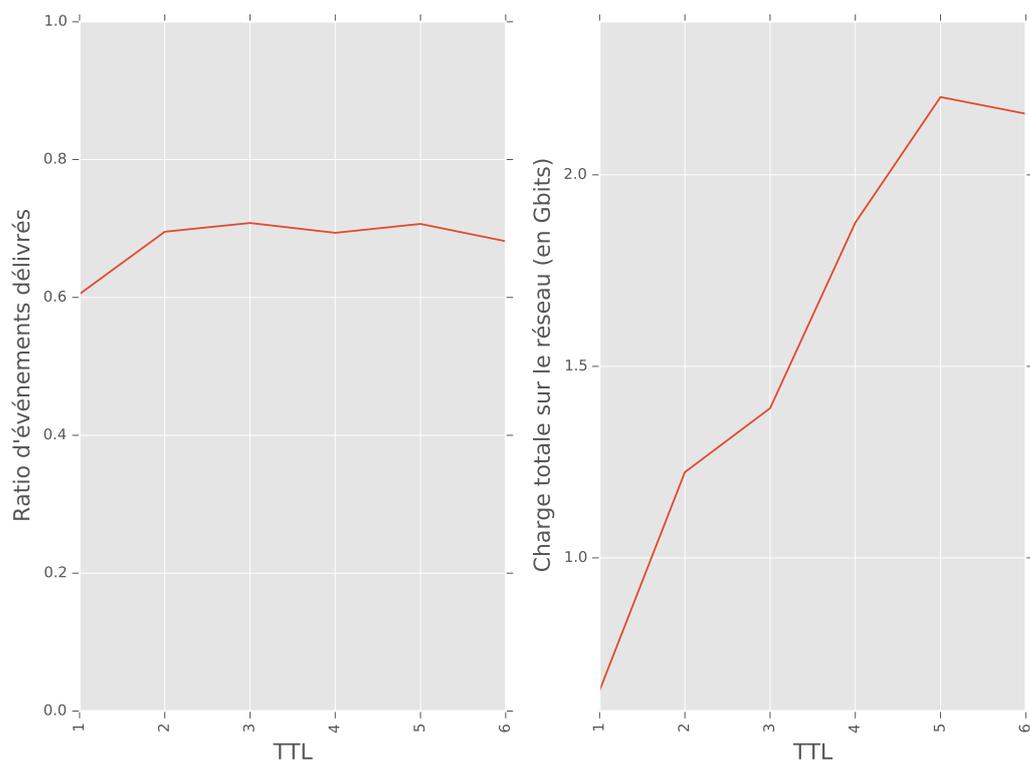


FIGURE 4.21 – Influence du TTL utilisé pour les messages SYNC (journée du 28/06/2013)

Dans nos simulations, deux applications sont utilisatrices du service P/S. Nous avons donc testé les 4 cas possibles (deux possibilités par application) et les résultats sont présentés dans les tableaux 4.4 et 4.5.

Stratégie (météo/compagnie)	Evt/Evt	Evt/Abo	Abo/Evt	Abo/Abo
Ratio d'événements transmis	$69.5 \pm 0.9\%$	$62.5 \pm 3.0\%$	$37.3 \pm 4.4\%$	$66.7 \pm 4.1\%$
Charge totale sur le réseau (en Gbits)	0.41 ± 0.03	0.27 ± 0.04	1.54 ± 0.07	1.56 ± 0.1

TABLEAU 4.4 – Résultats suivant la stratégie de diffusion utilisée pour la journée du 25 décembre 2012

Stratégie (météo/compagnie)	Evt/Evt	Evt/Abo	Abo/Evt	Abo/Abo
Ratio d'événements transmis	$73.7 \pm 1.0\%$	$69.1 \pm 1.2\%$	$25.2 \pm 0.8\%$	$68.1 \pm 0.8\%$
Charge totale sur le réseau (en Gbits)	2.0 ± 0.11	2.18 ± 0.3	4.13 ± 0.40	4.94 ± 0.18

TABLEAU 4.5 – Résultats suivant la stratégie de diffusion utilisée pour la journée du 28 juin 2013

Plusieurs constatations peuvent être extraites de ces résultats. Tout d'abord, comme pressenti, la charge totale générée sur le réseau varie suivant les stratégies de diffusion utilisées. Cette variation est très significative pour l'application permettant d'annoncer des phénomènes météo. En effet, cette application génère beaucoup plus d'abonnements que d'événements et en conséquence il est plus efficace de maintenir les abonnements au sein des groupes et de transmettre les événements à tous les responsables (stratégie

de type événement). La charge induite sur le réseau est doublée si l'autre approche est retenue.

La deuxième constatation concerne le ratio d'événements transmis. Nous remarquons qu'il est plus efficace de diffuser les événements sur tout le réseau. La justification se trouve au niveau du mécanisme mis en œuvre lors du changement d'un responsable de groupe, présenté au paragraphe 4.3.1.2. Lorsque ce sont les abonnements qui sont diffusés à tous les responsables, ceux-ci doivent enregistrer l'adresse source du responsable, utilisée lorsqu'un événement correspondant apparaît dans son groupe. Or, si entre temps, ce nœud n'est plus responsable de groupe ou si le nœud à l'origine de l'abonnement n'est plus dans ce groupe, l'événement ne sera pas transmis au bon destinataire et ne sera donc pas délivré au nœud intéressé avec pour conséquence une diminution du nombre d'événements délivrés.

4.3.4.3 Comparaison à des systèmes P/S

La dernière étape pour l'étude de notre proposition consiste à comparer les performances de ce système P/S avec ceux étudiés au chapitre précédent. Les tableaux 4.6 et 4.7 détaillent les résultats obtenus. Pour la solution s'appuyant sur CAPS, les paramètres suivants sont utilisés :

- pour les deux applications, la stratégie de diffusion "événement" est utilisée ;
- pour la synchronisation, la périodicité des messages SYNC est fixée à 30 secondes et le TTL de ces messages à 3 ;

De plus, afin d'avoir une base de comparaison commune, les solutions s'appuyant sur du routage géographique ou de proximité utilisent le module de routage unicast "idéal" implémenté sous Omnet++.

Solution	Heuristique simple	Géographique	Proximité	Surcouche
Ratio d'événements transmis	73.1 ± 2.1%	62.5 ± 1.4%	51.3 ± 2.7%	69.5 ± 0.9%
Charge totale sur le réseau (en Gbits)	2.48 ± 0.11	5.48 ± 0.23	0.90 ± 0.05	0.41 ± 0.03

TABLEAU 4.6 – Résultats des solutions P/S pour la journée du 25 décembre 2012

Solution	Heuristique simple	Géographique	Proximité	Surcouche
Ratio d'événements transmis	77.6 ± 1.4%	69.5 ± 0.4%	54.6 ± 2.3%	73.7 ± 1.0%
Charge totale sur le réseau (en Gbits)	12.3 ± 0.11	32.4 ± 2.2	4.73 ± 0.21	2.0 ± 0.11

TABLEAU 4.7 – Résultats des solutions P/S pour la journée du 28 juin 2013

Ces résultats mettent en lumière la pertinence de la proposition de système P/S que nous avons faite dans ce chapitre. En effet, cette approche offre un ratio d'événements transmis supérieur aux solutions utilisant du routage géographique ou de proximité. La valeur de ratio est proche de celui obtenu avec l'heuristique simple qui sert de référence de par son principe (diffusion périodique des événements dans tous le réseau). De plus,

notre proposition émet moins de données sur le réseau que toutes les autres solutions, de manière significative. Par exemple, pour la journée du 28/06/2013, elle émet 6 fois moins de trafic que l’heuristique simple et plus de deux fois moins que la solution basée sur du routage de proximité. Notre solution offre donc les meilleures performances de toutes les solutions testées.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la contribution majeure de cette thèse, à savoir la proposition d’une solution P/S adaptée aux AANETs s’appuyant sur une structure hiérarchique construite à l’aide d’un algorithme de regroupement à un 1-saut. Pour mettre en avant cette proposition, ce chapitre est constitué de deux parties.

La première partie se concentre sur les algorithmes de regroupement, permettant de constituer des groupes au sein d’un réseau. Après un état de l’art sur le domaine, CAPS est introduit. Il s’agit de l’algorithme de regroupement à un saut proposé dans cette thèse et adapté aux AANET. Son objectif est de maximiser la stabilité de la structure. Pour cela, il utilise notamment un critère utilisant le nombre et la mobilité relative avec les voisins pour déterminer les responsables de groupe. Les tests réalisés lors de cette thèse montrent que l’approche retenue est pertinente puisque, de toutes les solutions testées, CAPS offre les meilleures performances. En effet, il minimise le nombre de changements de responsable tout en contenant le nombre de groupes dans le réseau.

La deuxième partie se concentre sur le système P/S en lui même, construit au-dessus de CAPS. Son principe de fonctionnement est tout d’abord détaillé. Il repose sur les responsables de groupe servant de *courtier* ainsi que sur plusieurs mécanismes permettant d’optimiser la diffusion des événements. Il y a tout d’abord une adaptation à l’application, utilisatrice du service P/S, de la stratégie de diffusion des événements et des abonnements. Comme les simulations l’ont démontré, cette adaptation permet de réduire le trafic généré sur le réseau. L’autre mécanisme important est la synchronisation des responsables de groupe entre eux, permettant de mettre à jour les tables d’un nœud lorsque celui-ci devient responsable de groupe par exemple. Le résultat, vérifié au travers des simulations, est un système P/S offrant de très bonnes performances puisque le ratio d’événements délivrés est proche du maximum possible (obtenu avec l’heuristique simple présentée au chapitre précédent) avec une charge induite sur le réseau beaucoup plus faible que toutes les solutions testées auparavant.

Chapitre 5

Conclusion

Sommaire

5.1 Contributions de la thèse	100
5.1.1 Modélisation d'un contexte AANET sous Omnet++	100
5.1.2 Etude de systèmes P/S existants dans un contexte AANET	101
5.1.3 Développement d'un algorithme de regroupement adapté aux AANET	101
5.1.4 Développement d'un système P/S adapté aux AANET	103
5.2 Perspectives	103
5.2.1 Modélisation réalistes des couches basses	104
5.2.2 Utilisation d'un routage géographique	104
5.2.3 Etude du système P/S dans les VANET	105
5.2.4 Le module de mobilité	105

Ce chapitre conclut ce mémoire. Il résume dans un premier temps les contributions apportées lors de cette thèse. La seconde partie présente les idées à explorer pour poursuivre les travaux accomplis lors de cette thèse.

5.1 Contributions de la thèse

L'objectif de cette thèse était de développer une architecture permettant d'offrir un service de routage basé sur le contenu pour un AANET. Le principe est de ne plus utiliser une adresse (unicast, multicast ou broadcast) pour définir le(s) destinataire(s) d'un message mais uniquement le contenu du message. Chaque nœud du réseau déclare le contenu qui l'intéresse et c'est sur cette base que sont définis les destinataires d'un message. Pour mettre en œuvre cette approche, le paradigme publication / souscription (P/S) a été retenu, et plus précisément l'utilisation de systèmes P/S avec des abonnements basés sur le contenu des messages. Pour atteindre cet objectif, plusieurs contributions ont été apportées. Elles sont rappelées dans cette partie.

5.1.1 Modélisation d'un contexte AANET sous Omnet++

La première contribution de cette thèse est la modélisation d'un AANET sous Omnet++ se traduisant par plusieurs réalisations.

- Il y eu tout d'abord la définition d'une architecture protocolaire pour les nœuds. Nous avons fait notamment le choix de simplifier les couches physique et liaison pour concentrer nos études sur les couches supérieures. Au niveau réseau et transport, nous nous sommes appuyés sur des références du monde Internet, à savoir IP et UDP.
- Le second apport est le développement d'un module de mobilité basé sur le rejeu de trajectoires réelles. Durant cette thèse nous nous sommes plus particulièrement concentrés sur le trafic nord atlantique car, de par la densité d'avions présents et le peu de moyens de communications disponibles, le concept d'AANET a un grand intérêt pour cette région du monde comme moyen de communication complémentaire.
- Enfin, un travail important a été réalisé au niveau des applications. En effet, afin d'avoir une utilisation réaliste du service P/S, les applications aéronautiques, dont l'utilisation d'un service P/S permettrait d'optimiser les communications, ont été recensées et caractérisées. Sur cette base, deux applications ont été modélisées : l'annonce d'un phénomène météo et l'échanges de données entre le centre des opérations d'une compagnie aérienne et sa flotte d'avion.

5.1.2 Etude de systèmes P/S existants dans un contexte AANET

La modélisation d'un AANET effectuée, le second travail accompli lors de cette thèse a été l'évaluation des performances de certains systèmes P/S issus de l'état de l'art. Trois solutions ont été testées.

1. La première est une heuristique simple diffusant les événements à tous les nœuds du réseau. Cette solution sert de référence dans le sens où la stratégie utilisée permet de garantir un ratio d'événements transmis maximum même si en contrepartie l'utilisation du réseau est non optimale.
2. La seconde est une solution s'appuyant sur du routage géographique pour la diffusion des événements et des abonnements dans des zones géographiques liés aux messages. Les nœuds présents à l'intersection des zones géographiques d'un événement et des abonnements concordants servent d'intermédiaire entre l'éditeur et les abonnés.
3. Enfin, la dernière est une solution utilisant la notion de proximité. Chaque événement ou abonnement est transmis à proximité de l'émetteur initial. Comme pour la solution utilisant du routage géographique, les nœuds recevant à la fois un abonnement et un événement correspondant peuvent servir d'intermédiaire.

L'objectif de ce travail était double.

- Cela a tout d'abord permis de valider la modélisation du contexte AANET et de choisir les indicateurs pertinents pour évaluer les performances d'un système P/S.
- Ensuite, cela a permis de vérifier si certaines approches proposées pour les VANET étaient transposables dans les AANET puisque ces deux types de réseaux ad hoc partagent de nombreuses caractéristiques.

Néanmoins, les résultats obtenus ont été décevants puisque sur les trois solutions testées, la plus performante est l'heuristique simple notamment au niveau de la charge induite sur le réseau alors que cette solution, de par son principe, n'est pas optimale sur cet aspect. L'analyse des résultats a permis de comprendre le problème, notamment dû à l'application compagnie aérienne dont les événements ne sont pas liés à une zone géographique restreinte. Cette analyse a permis d'orienter la proposition de système P/S faite dans cette thèse.

5.1.3 Développement d'un algorithme de regroupement adapté aux AANET

Sur la base du comportement des solutions étudiées dans un premier temps, un système P/S adapté aux AANET a ensuite été proposé. L'idée directrice de cette solution

est de s'appuyer sur une surcouche pour la diffusion des événements vers les nœuds intéressés. Pour cette surcouche, nous avons choisi d'utiliser un algorithme de regroupement permettant de construire des groupes au sein du réseau, chaque groupe étant constitué d'un responsable et de membres. Précisément, l'utilisation d'un algorithme de regroupement à un saut a été retenue pour le compromis offert par cette catégorie entre le nombre de groupes et la limitation des ressources consommées sur le réseau pour maintenir ces groupes (pour la plupart des solutions entrant dans cette catégorie, la construction et la maintenance des groupes sont uniquement basées sur l'utilisation de messages périodiques envoyés aux voisins).

Après un état de l'art détaillé, un nouvel algorithme a été proposé, CAPS. Son objectif principal est de maximiser la stabilité des groupes dans le contexte d'un AANET. Pour cela, il reprend plusieurs idées introduites par des algorithmes existants.

- Il y a tout d'abord l'utilisation d'un poids combinant plusieurs critères pour l'élection des responsables de groupe. Dans le cas de CAPS, deux critères sont utilisés. Le premier est basé sur la mobilité relative entre les nœuds voisins puisque des études précédentes ont montré que le choix d'un responsable de groupe ayant une mobilité relative faible avec les autres membres permet d'augmenter la stabilité de la structure. Le deuxième critère utilisé est le nombre de voisins. Pour ce critère, notre approche a consisté à privilégier les nœuds ayant un nombre de voisins compris entre deux bornes afin de rechercher une taille optimale pour les groupes (c'est à dire un compromis entre le nombre de groupes dans le réseau et un nombre raisonnable de membres par groupe pour minimiser la charge du responsable de groupe).
- Au niveau de la maintenance des groupes, la stabilité des groupes a été recherchée en imposant que deux conditions soient respectées pour fusionner deux groupes dont les responsables sont à portée. La première permet de vérifier que les deux responsables de groupe ont des directions proches afin d'éviter de fusionner deux groupes qui devront être séparés peu de temps après. La deuxième condition à respecter est reprise d'une solution existante, SSCA, et dépend du nombre de voisins communs entre les deux responsables, l'idée étant que plus ils ont de voisins communs, plus il est intéressant de fusionner les groupes.

Les simulations réalisées lors de cette thèse montrent la pertinence des choix faits pour la conception de CAPS. En effet, il permet d'établir une structure maximisant la stabilité, puisque de toutes les solutions testées, c'est CAPS qui offre le moins de changement de responsable de groupe maximisant ainsi la durée de vie des responsables tout en contenant le nombre de groupe dans le réseau. Par exemple, CAPS augmente cette durée de vie d'environ 50% par rapport à SSCA tout en n'augmentant le nombre de groupe que d'environ 5%.

5.1.4 Développement d'un système P/S adapté aux AANET

En s'appuyant sur CAPS, un système P/S a été proposé et modélisé. Il s'appuie sur deux idées principales.

- CAPS permet de créer une structure hiérarchique sur le réseau. Le système P/S s'appuie sur cette surcouche avec l'utilisation des responsables de groupe en tant que courtier pour faire le lien entre les événements et les abonnés intéressés.
- La deuxième idée est l'utilisation d'un service de routage multicast offert par la couche réseau pour la diffusion des événements ou des abonnements (suivant la stratégie utilisée) vers tous les responsables de groupe.

L'efficacité de cette approche a été améliorée à l'aide de deux fonctionnalités supplémentaires. La première consiste à adapter la stratégie de diffusion à l'application utilisant le service P/S. En effet, certaines applications génèrent plus d'événements que d'abonnements et pour d'autres c'est le contraire. Le fait, que lors de son initialisation, une application précise au système P/S la stratégie de diffusion souhaitée permet de réduire le trafic généré sur le réseau. Les simulations ont montré que suivant les cas, la charge totale émise sur le réseau pouvait passer du simple au double.

L'autre fonctionnalité consiste à gérer de manière optimale les modifications de la surcouche et particulièrement l'apparition d'un nouveau responsable de groupe. En effet, cette modification nécessite que celui-ci se synchronise avec les membres de son groupe et les autres responsables. La solution retenue est basée sur l'envoi régulier de messages par les responsables contenant la liste des événements et des abonnements en leur possession. Suite à la réception de ce message, les membres du groupe ou les autres responsables peuvent se synchroniser, c'est à dire demander et récupérer les informations qui leur manquent. De plus une option permet de jouer sur la portée de ces messages périodiques afin de trouver le bon compromis entre l'efficacité de la synchronisation et le trafic généré sur le réseau.

Les simulations réalisées lors de cette thèse ont démontré le bien-fondé de cette solution. Les performances obtenues sont très bonnes puisque le ratio d'événements délivrés est proche de celui obtenu avec l'heuristique simple mais avec une charge induite sur le réseau divisée par 6.

5.2 Perspectives

Les travaux réalisés lors de cette thèse ont permis de développer un système P/S adapté aux AANET dont les premières études de performance confirment l'intérêt. Néanmoins, de futurs travaux peuvent être envisagés. Ils sont détaillés dans cette section.

5.2.1 Modélisation réalistes des couches basses

Dans cette thèse, nous avons fait le choix de simplifier les couches physiques et liaison des nœuds du réseau afin de se concentrer sur le système P/S et les applications utilisatrices du service. Il serait intéressant de modéliser plus finement les couches physique et liaison afin de rendre nos simulations plus réalistes. Dans l'équipe de recherche ResCo (réseau de communication), dans laquelle ces travaux se sont déroulés, une autre thèse est en cours. Elle vise à définir une solution de routage performante dans les AANET. Au niveau de la couche physique et liaison, cette thèse propose de s'appuyer sur une adaptation du Random Packet Code Division Multiple Access (RP-CDMA) [MH12] pour les AANET. Il est prévu d'implémenter cette solution dans les nœuds modélisés lors de cette thèse et étudier les conséquences sur les performances globales du système P/S.

De la même manière, tous les résultats présentés pour le système P/S proposé dans cette thèse ont été réalisés avec l'utilisation d'un routage unicast et multicast "idéal". Il faudrait maintenant étudier son comportement avec des protocoles de routage réalistes. Deux approches sont possibles.

- La première consiste à utiliser des protocoles de routage existants. Nous pouvons par exemple citer AODV (introduit pour l'étude présentée dans le chapitre 3) et Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (MAODV) [HP15], qui est une extension d'AODV pour la gestion des communications multicast. Il s'agit de protocoles de référence pour les MANET et leur utilisation, en complément de l'utilisation du RP-CDMA, permettrait d'avoir une modélisation plus complète des nœuds.
- La deuxième approche consiste à utiliser l'algorithme de regroupement CAPS pour développer un nouvel algorithme de routage unicast et multicast. En effet, de nombreuses propositions de protocole de routage utilisant des groupes ont déjà été faites, comme dans [SU10] ou [YFL11]. L'optimisation consistant à utiliser CAPS pour le protocole de routage et le système P/S permettrait de diminuer le trafic généré sur le réseau (par exemple en mutualisant les messages HELLO envoyé périodiquement aux voisins) et semble donc une piste à explorer.

5.2.2 Utilisation d'un routage géographique

Contrairement aux systèmes P/S basés sur du routage géographique ou du routage de proximité, notre proposition n'utilise pas pleinement pour le moment le contexte du nœud (c'est à dire sa position géographique et sa route) pour optimiser la diffusion des événements et des abonnements. Dans notre solution, ce contexte n'est utilisé que pour restreindre la liste des destinataires d'un événement. Ce choix initial a été motivé par la volonté de proposer un système adapté à toutes les applications envisagées pour

utiliser le système P/S. Dans ces applications, certaines, comme la communication d'une compagnie aérienne vers sa flotte (décrite au paragraphe 3.2.2.1) n'associe pas de contexte géographique aux événements ou abonnements. Il était donc intéressant d'offrir en premier lieu une approche pertinente pour ce type d'application.

Maintenant que le système proposé a atteint cet objectif, la prochaine étape serait d'utiliser plus largement le contexte des nœuds lorsque c'est possible. Une idée serait d'utiliser du routage géographique pour diffuser les événements ou les abonnements (suivant l'approche demandée par l'application) uniquement vers les responsables de groupes situés dans les zones géographiques données dans les contextes des messages. Cette optimisation devrait permettre de réduire le trafic généré par le système P/S. Sur le choix du protocole de routage géographique à utiliser, nous pourrions repartir de LBM dans un premier temps, pour ensuite essayer de trouver un protocole plus optimal pour les AANET.

5.2.3 Etude du système P/S dans les VANET

Dans la partie 1.2.3 du chapitre d'introduction, nous avons vu que des analogies existent entre les VANET et les AANET. Lors de cette thèse, nous nous sommes appuyés sur ces analogies en transposant des solutions imaginées pour les VANET aux AANET. Il serait maintenant intéressant de faire le contraire, c'est à dire de tester le système P/S développé dans cette thèse sur un VANET. Cela permettrait d'évaluer la pertinence de notre approche dans un autre contexte. Pour la modélisation d'un VANET, nous pourrions repartir de travaux qui ont été déjà effectués comme VEHICLES In Network Simulation (VEINS)¹.

5.2.4 Le module de mobilité

Dans le but d'être réaliste, le module de mobilité développé sous Omnet++ lors de cette thèse rejoue des journées de trafic réels. Bien qu'intéressante car plus pertinente que des modèles aléatoires souvent utilisés pour étudier les MANET, cette approche souffre de quelques limitations. Notamment, Le choix de s'appuyer sur des traces réelles implique que la trajectoire des avions est une entrée de la simulation et ne peut donc pas être modifiée suivant les événements se déroulant durant cette simulation. Par exemple, il serait logique que, lorsqu'un événement météo dangereux est notifié à un avion, celui-ci modifie sa route pour contourner ce phénomène. Or ce n'est pas possible avec l'approche retenue lors de cette thèse. Une amélioration de ce module de mobilité serait donc de prendre en compte les communications dans le mouvement des nœuds afin que chaque nœud adapte sa trajectoire suivant les informations qu'il reçoit. Ce type de modèle de mobilité existe déjà pour les VANET (comme présenté dans [SGD11]).

1. <http://veins.car2x.org/>

Bibliographie

- [AGD⁺06] Emmanuelle Anceaume, Maria Gradinariu, Ajoy Kumar Datta, Gwendal Simon, and Antonino Virgillito. A Semantic Overlay for Self- Peer-to-Peer Publish/Subscribe. In *ICDCS*, page 22. IEEE Computer Society, 2006. 31
- [AH12] Ahmed Ahizoune and Abdelhakim Hafid. A new stability based clustering algorithm (SBCA) for VANETs. In *LCN Workshops*, pages 843–847. IEEE, 2012. 78
- [AM15] R. Apaza and T. Maeda. Nasa-Hitachi AeroMACS technology trials and Minimum Operational Performance System (MOPS) conformance testing. In *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2015 IEEE/AIAA 34th*, pages 2D3–1–2D3–11, Sept 2015. 10
- [AP00] A.D. Amis and R. Prakash. Load-balancing clusters in wireless ad hoc networks. In *Application-Specific Systems and Software Engineering Technology, 2000. Proceedings. 3rd IEEE Symposium on*, pages 25–32, 2000. 76
- [ASS⁺99] Marcos K. Aguilera, Robert E. Strom, Daniel C. Sturman, Mark Astley, and Tushar D. Chandra. Matching Events in a Content-based Subscription System. In *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, PODC '99, pages 53–61, New York, NY, USA, 1999. ACM. 24
- [BCM⁺99] Guruduth Banavar, Tushar Deepak Chandra, Bodhi Mukherjee, Jay Nagarajarao, Robert E. Strom, and Daniel C. Sturman. An Efficient Multicast Protocol for Content-Based Publish-Subscribe Systems. In *ICDCS*, pages 262–272. IEEE Computer Society, 1999. 27
- [BEH03] J. Blum, A. Eskandarian, and L.J. Hoffman. Performance characteristics of inter-vehicle ad hoc networks. In *Intelligent Transportation Systems, 2003. Proceedings. 2003 IEEE*, volume 1, pages 114–119 vol.1, oct. 2003. 14
- [Bes12] Frédéric Besse. *Aeronautical ad hoc network*. PhD thesis, Institut Supérieur de l’Aéronautique et de l’Espace (ISAE), February 2012. 13, 42, 43, 58, 61

- [BKL01] P. Basu, N. Khan, and T. D C Little. A mobility based metric for clustering in mobile ad hoc networks. In *Distributed Computing Systems Workshop, 2001 International Conference on*, pages 413–418, Apr 2001. 75
- [CDT02] Mainak Chatterjee, SajalK. Das, and Damla Turgut. WCA : A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks. *Cluster Computing*, 5(2) :193–204, 2002. 77
- [CJ03] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626 (Experimental), October 2003. 12
- [CMM09] Gianpaolo Cugola, Alessandro Margara, and Matteo Migliavacca. Context-aware publish-subscribe : Model, implementation, and evaluation. In *ISCC*, pages 875–881. IEEE, 2009. 38, 54
- [CP06] Gianpaolo Cugola and Gian Pietro Picco. REDS : A Reconfigurable Dispatching System. In *Proceedings of the 6th International Workshop on Software Engineering and Middleware, SEM '06*, pages 9–16, New York, NY, USA, 2006. ACM. 38
- [CRW01] Antonio Carzaniga, David S. Rosenblum, and Alexander L. Wolf. Design and evaluation of a wide-area event notification service. *ACM Transactions on Computer Systems*, 19(3) :332–383, 2001. 29, 58
- [CS05] Fengyun Cao and JaswinderPal Singh. MEDYM : Match-Early with Dynamic Multicast for Content-Based Publish-Subscribe Networks. In Gustavo Alonso, editor, *Middleware 2005*, volume 3790 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 292–313. Springer Berlin Heidelberg, 2005. 27
- [CWL97] Ching-Chuan Chiang, Hsiao-Kuang Wu, Winston Liu, and Mario Gerla. Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel. In *proceedings of IEEE SICON*, volume 97, pages 197–211, 1997. 74
- [EFGK03] Patrick Th. Eugster, Pascal A. Felber, Rachid Guerraoui, and Anne-Marie Kermarrec. The many faces of publish/subscribe. *ACM Comput. Surv.*, 35 :114–131, June 2003. 19
- [EGH] Patrick Eugster, Benoît Garbinato, and Adrian Holzer. Pervaho : A specialized middleware for mobile context-aware applications. *Electronic Commerce Research*, 9(4) :245–268. 34
- [EPG11] M. Ehammer, E. Pschernig, and Thomas Graupl. AeroMACS - An airport communications system. In *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2011 IEEE/AIAA 30th*, pages 4C1–1–4C1–16, Oct 2011. 10
- [EWB87] Anthony Ephremides, J.E. Wieselthier, and D.J. Baker. A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling. *Proceedings of the IEEE*, 75(1) :56–73, Jan 1987. 73

- [FGKZ03] Ludger Fiege, Felix Gartner, Oliver Kasten, and Andreas Zeidler. Supporting Mobility in Content-Based Publish/Subscribe Middleware. In Markus Endler and Douglas Schmidt, editors, *Middleware 2003*, volume 2672 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 998–998. Springer Berlin / Heidelberg, 2003. 10.1007/3-540-44892-6. 35
- [FHKK06] B. Fenner, M. Handley, H. Holbrook, and I. Kouvelas. Protocol Independent Multicast - Sparse Mode (PIM-SM) : Protocol Specification (Revised). RFC 4601 (Proposed Standard), August 2006. 29
- [FJL⁺01] Françoise Fabret, H. Arno Jacobsen, François Llirbat, João Pereira, Kenneth A. Ross, and Dennis Shasha. Filtering Algorithms and Implementation for Very Fast Publish/Subscribe Systems. In *Proceedings of the 2001 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, SIGMOD '01, pages 115–126, 2001. 24
- [FPM04] Umar Farooq, Eric W. Parsons, and Shikharesh Majumdar. Performance of publish/subscribe middleware in mobile wireless networks. *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, 29 :278–289, January 2004. 33
- [FR07] Davide Frey and Gruia-Catalin Roman. Context-aware publish subscribe in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 9th international conference on Coordination models and languages*, COORDINATION'07, pages 37–55, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag. 34, 36, 54
- [GeAK11] Badreddine Guizani, Béchir el Ayeub, and Abderrafaa Koukam. Hierarchical cluster-based link state routing protocol for large self-organizing networks. In *HPSR*, pages 203–208. IEEE, 2011. 75
- [GK00] Piyush Gupta and P. R. Kumar. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2) :388–404, 2000. 70
- [GT95] Mario Gerla and Jack Tzu-Chieh Tsai. Multicluster, mobile, multimedia radio network. *Wireless Networks*, 1(3) :255–265, 1995. 74
- [HEG12] A. Holzer, P. Eugster, and B. Garbinato. ALPS - Adaptive Location-based Publish/Subscribe. *Comput. Netw.*, 56(12) :2949–2962, august 2012. 34, 37
- [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, quarter 2009. 14
- [HL08] H. Hartenstein and K.P. Laberteaux. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *Communications Magazine, IEEE*, 46(6) :164–171, june 2008. 14
- [HP15] A. Hasti and U.S. Pandey. Analysis of performance of multicasting routing protocol MAODV for QoS parameters using NS2. In *Computing for Sus-*

- tainable Global Development (INDIACom), 2015 2nd International Conference on*, pages 845–848, March 2015. 104
- [HXG02] Xiaoyan Hong, Kaixin Xu, and M. Gerla. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks. 16 :11–21, 2002. 70
- [JC03] Lusheng Ji and M. Scott Corson. Explicit Multicasting for Mobile Ad Hoc Networks. *Mob. Netw. Appl.*, 8(5) :535–549, October 2003. 27
- [KV99] Y.-B. Ko and N. H. Vaidya. Geocasting in mobile ad hoc networks : Location-based multicast algorithms. In *Proc. of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WM-CSA)*, 1999. 54, 55
- [LCM09] I. Leontiadis, P. Costa, and C. Mascolo. Persistent content-based information dissemination in hybrid vehicular networks. In *Pervasive Computing and Communications, 2009. PerCom 2009. IEEE International Conference on*, pages 1–10, march 2009. 36
- [LRD15] K. Legrand, C. Rabut, and D. Delahaye. Wind networking applied to aircraft trajectory prediction. In *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2015 IEEE/AIAA 34th*, pages 1A4–1–1A4–10, Sept 2015. 49
- [LW07] Fan Li and Yu Wang. Routing in vehicular ad hoc networks : A survey. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, 2(2) :12–22, june 2007. 14
- [LZ13] Yang Liu and Yanbo Zhu. A collaborative integrity monitor algorithm for low space aviation under limited number of navigation satellites. In *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2013 International Conference on*, pages 910–915, Dec 2013. 50
- [Mai04] Christian Maihöfer. A survey of geocast routing protocols. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 6(1-4) :32–42, 2004. 35
- [MC02] R. Meier and V. Cahill. STEAM : event-based middleware for wireless ad hoc networks. In *Distributed Computing Systems Workshops, 2002. Proceedings. 22nd International Conference on*, pages 639–644, 2002. 34, 37
- [MCP08] Luca Mottola, Gianpaolo Cugola, and Gian Pietro Picco. A Self-Repairing Tree Topology Enabling Content-Based Routing in Mobile Ad Hoc Networks. *IEEE Trans. Mob. Comput.*, 7(8) :946–960, 2008. 38
- [MD10] J.L. Martins and S. Duarte. Routing algorithms for content-based publish/subscribe systems. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 12(1) :39–58, First 2010. 26
- [MG11] T. Mishra, D. Garg, and M.M. Gore. A Publish/Subscribe Communication Infrastructure for VANET Applications. In *Advanced Information Networking and Applications (WAINA), 2011 IEEE Workshops of International Conference on*, pages 442–446, March 2011. 34

- [MH12] T. Mortimer and J. Harms. A MAC protocol for multihop RP-CDMA ad hoc wireless networks. In *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on*, pages 424–429, June 2012. 104
- [MK12] L.A. Maglaras and D. Katsaros. Distributed clustering in vehicular networks. In *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2012 IEEE 8th International Conference on*, pages 593–599, Oct 2012. 78
- [MRR80] John M McQuillan, Isaac Richer, and Eric C. Rosen. The New Routing Algorithm for the ARPANet. *IEEE Transactions on Communications*, 28(5) :711—719, 1980. 38
- [OAA⁺] Lukasz Opyrchal, Mark Astley, Joshua Auerbach, Guruduth Banavar, Robert Strom, and Daniel Sturman. Exploiting IP Multicast in Content-based Publish-subscribe Systems. In *IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms, Middleware '00*. 28
- [PB03] Peter R. Pietzuch and Jean Bacon. Peer-to-peer overlay broker networks in an event-based middleware. In *DEBS '03 : Proceedings of the 2nd international workshop on Distributed event-based systems*, pages 1–8, New York, NY, USA, 2003. ACM. 30
- [PBRD03] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC 3561 (Experimental), July 2003. 12, 57
- [PGS⁺10] Helge Parzyjegl, Daniel Graff, Arnd Schröter, Jan Richling, and Gero Mühl. Design and Implementation of the Rebeca Publish/Subscribe Middleware. In Kai Sachs, Ilia Petrov, and Pablo Guerrero, editors, *From Active Data Management to Event-Based Systems and More*, volume 6462 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 124–140. Springer Berlin / Heidelberg, 2010. 10.1007/978-3-642-17226-7. 35
- [RD01] Antony I. T. Rowstron and Peter Druschel. Pastry : Scalable, Decentralized Object Location, and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems. In *Proceedings of the IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms Heidelberg, Middleware '01*, pages 329–350, London, UK, 2001. Springer-Verlag. 30
- [RKCD01] Antony I. T. Rowstron, Anne-Marie Kermarrec, Miguel Castro, and Peter Druschel. SCRIBE : The Design of a Large-Scale Event Notification Infrastructure. In *Networked Group Communication*, pages 30–43, 2001. 31
- [SESS14] M. Schnell, U. Epple, D. Shutin, and N. Schneckenburger. LDACS : future aeronautical communications for air-traffic management. *Communications Magazine, IEEE*, 52(5) :104–110, May 2014. 10

- [SGD11] Christoph Sommer, Reinhard German, and Falko Dressler. Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(1) :3–15, January 2011. 105
- [SJK06] Ehssan Sakhaee, Abbas Jamalipour, and Nei Kato. Aeronautical ad hoc networks. In *WCNC*, pages 246–251. IEEE, 2006. 12
- [SK14] Manu Sood and Shivani Kanwar. Clustering in MANET and VANET : A survey. In *Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA), 2014 International Conference on*, pages 375–380, April 2014. 77
- [SMLN⁺03] Ion Stoica, Robert Morris, David Liben-Nowell, David Karger, M. Frans Kaashoek, Frank Dabek, and Hari Balakrishnan. Chord : A Scalable Peer-to-peer Lookup Service for Internet Applications. *IEEE Transactions on Networking*, 11 :1–10, February 2003. 30
- [SU10] S. Sethi and S.K. Udghata. Scalable Cluster Based Ad hoc On-demand distance vector routing protocol for MANET. In *Wireless Communication and Sensor Networks (WCSN), 2010 Sixth International Conference on*, pages 1–6, Dec 2010. 104
- [TA04] P. Triantafillou and I. Aekaterinidis. Content-based Publish/Subscribe over Structured P2P Networks. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Distributed Event-Based Systems*, 2004. 30
- [TAJ04] David Tam, Reza Azimi, and Hans-Arno Jacobsen. Building Content-Based Publish/Subscribe Systems with Distributed Hash Tables. In Karl Aberer, Manolis Koubarakis, and Vana Kalogeraki, editors, *Databases, Information Systems, and Peer-to-Peer Computing*, volume 2944 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 138–152. Springer Berlin Heidelberg, 2004. 30
- [TML08] Y. Toor, P. Muhlethaler, and A. Laouiti. Vehicle Ad Hoc networks : applications and related technical issues. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 10(3) :74–88, quarter 2008. 14
- [VH08] András Varga and Rudolf Hornig. An overview of the OMNeT++ simulation environment. In *Simutools '08 : Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, pages 1–10, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2008. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). 41
- [XL08] Sun Xi and Xia-Miao Li. Study of the Feasibility of VANET and its Routing Protocols. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference on*, pages 1–4, oct. 2008. 14

- [XZ10] Tao Xue and Rui Zhou. A Content-Based Publish-Subscribe Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Network. In *Internet Technology and Applications, 2010 International Conference on*, pages 1–4, aug. 2010. 58
- [YC05] J.Y. Yu and P.H.J. Chong. A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 7(1) :32–48, First 2005. 70, 72
- [YFL11] M. Younis, O. Farrag, and Sookyoung Lee. Cluster Mesh Based Multicast Routing in MANET : An Analytical Study. In *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–6, June 2011. 104
- [ZH] Rongmei Zhang and Y.C. Hu. HYPER : A Hybrid Approach to Efficient Content-Based Publish/Subscribe. In *Distributed Computing Systems, 2005. ICDCS 2005. Proceedings. 25th IEEE International Conference on*. 28

Annexes

Annexe A

Liste des acronymes

- AAC** Aeronautical Administrative Control. 4
- AANET** Aeronautical Ad-Hoc Network. 12, 13, 15, 16, 18, 21, 22, 32, 33, 38, 39, 41–44, 47, 49–51, 53, 54, 57–61, 67, 69, 71–73, 77, 82, 83, 86, 88, 89, 91, 98, 100–105
- ACARS** Aircraft Communications Addressing and Reporting System. 4–6, 8, 51
- ACM** Adaptative Coding and Modulation. 11
- ADS-B** Automatic Dependant Surveillance - Broadcast. 11
- ALPS** Adaptive Location-based Publish / Subscribe. 36
- AOA** ACARS Over AVLC. 8
- AOC** Aeronautical Operation Control. 4, 5
- AODV** Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing. 57, 63, 66, 104
- APC** Aeronautical Passenger Communication. 4, 7
- API** Applications Programming Interface. 19, 44
- ATN** Aeronautical Telecommunication Network. 5, 7, 8
- ATSC** Air Traffic Services Communication. 4, 5, 7, 9
- AVLC** Aviation VHF Link Control. 8
- CAPS** Clustering Algorithm for Publish / Subscribe. 72, 78, 80–86, 88, 89, 91, 93, 97, 98, 102–104
- CDF** Cumulative Distribution Function. 86
- CDMA** Code Division Multiple Access. 42
- CFMU** Central Flow Management Unit. 46
- CLNP** Connection Less Network Protocol. 7
- COTP** Connection Oriented Transport Protocol. 7
- CPDLC** Controller Pilot Data Link Communication. 6

CPFSK Continuous Phase Frequency Shift Keying. 10

CSMA Carrier Sense Media Access. 8

D8PSK Differentially encoded 8-phase Shift Keying. 8

DDR Demand Data Repository. 45–47, 53

DHT Distributed Hash Table. 29, 30, 34, 38

DLBC Degree-Load-Balancing Clustering. 76

ESA European Space Agency. 10

FANS Future Air Navigation System. 5–7

FANS 1/A Future Air Navigation System 1/A. 7

GBAS Ground-based augmentation system. 50

GSE Generic Stream Encapsulation. 11

GSM Global System for Mobile Communications. 10

HCC Highest Connectivity Clustering. 73, 74

HDLC High-level Data Link Control. 8

HF High Frequency. 4

HFDL HF Data Link. 8, 9

IP Internet Protocol. 7, 43, 89, 100

LBM Location Based Multicast. 54, 55, 62, 67, 105

LCC Least Cluster Change. 74–76, 78

L-DACS L-band Digital Aeronautical Communication System. 10

LIC Lowest ID Clustering. 73–75

MAC Medium Access Layer. 8, 58, 77

MANET Mobile Ad-Hoc Network. 12, 16, 18, 37, 42, 43, 54, 56, 57, 70, 72, 77, 88, 104, 105

MAODV Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing. 104

NAT North Atlantic Track. 44, 45, 57

OACI Organisation de l’aviation civile internationale. 4–7, 9

OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing. 10

OOOI Out, Off, On, In. 4, 6

OSI Open Systems Interconnection. 7

OSPF Open Shortest Path First. 26

P2P Peer To Peer. 29, 31

PBN Performance Based Navigation. 50

PCBD Persistent Content-Based Dissemination. 35

POA Plain Old Acars. 4, 5, 8

PST Parallel Search Trees. 24, 27

RAIM Receiver Autonomous Integrity Monitoring. 50

REDS REconfigurable Dispatching System. 37

RFC Request For Comments. 57

RNP Required Navigation Performance. 50

RP-CDMA Random Packet Code Division Multiple Access. 104

RPF Reverse Path Forwarding. 29

SATCOM SATellite COMmunication. 4, 8

SBAS Satellite-based augmentation system. 50

SBCA Stability-Based Clustering Algorithm. 78

SPCF Shortest Path Context Forwarding. 37

SQL Structured Query Language. 20

TCP Transmission Control Protocol. 43

TDMA Time Division Multiple Access. 9

TTL Time To Live. 92, 94, 97

UDP User Datagram Protocol. 43, 100

VANET Vehicular Ad-Hoc Network. 12, 13, 18, 33–35, 38, 41, 42, 44, 54, 72, 73, 77, 101, 105

VDL VHF Data Link. 8, 10, 44

VEINS VEhicles In Network Simulation. 105

VHF Very High Frequency. 3, 8

WCA Weighted Clustering Algorithm. 76

XML Extensible Markup Language. 20