



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Réseaux, Télécommunications, Systèmes et Architecture

Présentée et soutenue par :

M. FAROUK MEZGHANI

le vendredi 9 octobre 2015

Titre :

LA DISSEMINATION DE CONTENUS DANS LES RESEAUX
VEHICULAIRES

Ecole doctorale :

Mathématiques, Informatique, Télécommunications de Toulouse (MITT)

Unité de recherche :

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (I.R.I.T.)

Directeur(s) de Thèse :

M. ANDRE LUC BEYLOT

M. RIADH DHAOU

Rapporteurs :

M. MARCO FIORE, CONSIGLIO NAZIONALE DE RECERCH

M. YACINE GHAMRI-DOUDANE, UNIVERSITE DE LA ROCHELLE

Membre(s) du jury :

M. STEVEN MARTIN, UNIVERSITE PARIS-SUD, Président

M. ANDRE LUC BEYLOT, INP TOULOUSE, Membre

M. CHRISTIAN BONNET, INSTITUT EURECOM SOPHIA ANTIPOLIS, Membre

Mme MICHELE NOGUEIRA, UNIVERSIDADE FEDERALE PARANA CURITIBA, Membre

Mme NATHALIE MITTON, INRIA VILLENEUVE D'ASCQ, Membre

M. RIADH DHAOU, INP TOULOUSE, Membre

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de thèse André-Luc Beylot qui m'a aidé d'abord à trouver un stage de projet fin d'études et ensuite m'a proposé cette thèse durant laquelle il a su me faire confiance et me laisser toute la liberté de mener mon travail tout en m'accompagnant de ses conseils toujours avisés. Je remercie également mes co-encadrants : Riadh Dhaou et Michele Nogueira, qui ont su m'accorder leur confiance et me guider tout au long de ces trois années. Je les remercie très sincèrement pour leur investissement personnel et professionnel pour me faire avancer.

Je remercie Steven Martin qui m'a fait l'honneur de présider le jury. J'adresse mes sincères remerciements à Marco Fiore et Yacine Ghamri-Doudane pour leur lecture minutieuse de mon manuscrit et pour avoir accepté de rapporter cette thèse. Je remercie également Nathalie Mitton et Christian Bonnet pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury. Je leur en suis reconnaissant aussi pour leurs remarques et suggestions qui ont contribué à améliorer la qualité de ce mémoire.

Je souhaite aussi remercier les secrétaires de l'IRIT, SAM, Sylvie et Audrey pour leur accueil, leur discussion et de nous avoir rendu la vie bien plus facile. J'adresse ma gratitude à mes amis, aux autres doctorants et tous ceux que j'ai côtoyé : Alexandra, Aziz, les Mohamed (Hussein, Bouazzouni et Mezghani), les Ahmed (Amari et Khalid), Jean-Gabriel, Eric, Elie, Guillaume, Achraf, Abderrahim, Abdelghafour, Raoul, Jean-Adrien, George, Emilie, Patrice, Renaud, Bouchra, Nesrine, Jalal, Chakadkit, et bien d'autres. Je garderai en mémoire les moments magnifiques que nous avons partagés ensemble.

Enfin, et le meilleur pour la fin, je remercie tout particulièrement ma famille qui m'a toujours soutenu, surtout ma mère Samia qui depuis mon enfance n'a cessé de me soutenir, de m'encourager, de m'accompagner dans tous les moments, pour me donner goût à la vie et pour que je puisse devenir la personne que je suis à présent.

Farouk

Résumé

Les réseaux véhiculaires constituent une catégorie de réseaux sans fil mobiles à part entière et présentent l'originalité de permettre aux véhicules de communiquer les uns avec les autres mais aussi avec l'infrastructure quand elle existe. L'apparition des réseaux véhiculaires s'est accompagné de l'apparition d'une myriade et variété d'applications potentielles allant de la sécurité à la gestion du trafic routier en passant par les applications de divertissement et de confort des usagers de la route. Ces applications ont suscité beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs, des constructeurs des automobiles et des opérateurs des télécommunications.

Les applications d'information et de divertissement, pour lesquelles une grande quantité de contenus peut exister, exigent que les contenus engendrés soient propagés au travers des véhicules et/ou de l'infrastructure jusqu'à atteindre les utilisateurs intéressés tout en respectant les durées de vie potentiellement limitées des contenus. La dissémination de contenus pour ce type d'applications reste un défi majeur en raison de plusieurs facteurs tels que la présence de beaucoup de contenus, la connectivité très intermittente mais encore les intérêts potentiellement hétérogènes des utilisateurs.

C'est à cette thématique que nous sommes intéressés dans cette thèse ; Tout d'abord, nous nous proposons une nouvelle métrique qui calcule l'utilité apportée aux utilisateurs. Elle permet de mesurer leur satisfaction par rapport aux contenus reçus. Nous la jugeons nécessaire pour évaluer les performances d'une approche de dissémination pour les applications de confort par opposition à des applications de sécurité routière.

Dans un deuxième temps, nous nous concentrons sur le développement d'un nouveau protocole de dissémination, appelé I-PICK, et d'une solution de sélection des nœuds relais, appelé I-SEND,

pour disséminer les contenus d'information et de divertissement en tenant compte des préférences des utilisateurs par rapport aux contenus reçus. Notre proposition est fondée sur l'échange de messages périodiques permettant l'estimation des durées de contacts et la connaissance des préférences des utilisateurs. Ces informations sont ensuite utilisées, dans un premier temps, pour effectuer un ordonnancement efficace des contenus lors de la dissémination puis choisir les relais permettant de maximiser l'utilité des utilisateurs par rapport aux contenus reçus dans un environnement caractérisé par des faibles durées de communication. Au travers de simulations nous confirmons l'efficacité de notre approche.

Pour conforter le fonctionnement de nos mécanismes, nous avons implanté dans un environnement réel nos propositions I-PICK et I-SEND. Au travers d'un scénario simple, nous avons mis en évidence des risques liés à l'hétérogénéité des machines ou bien encore la difficulté du paramétrage des temporisations. Ces premiers résultats positifs montrent l'intérêt de notre technique et ouvre des pistes d'amélioration.

Notre dernière contribution concerne des mécanismes de réduction du trafic cellulaire à l'aide des communications opportunistes entre les véhicules. Quand un contenu est disponible auprès d'un serveur de contenus accessible par le réseau cellulaire, il est nécessaire de proposer une méthode efficace de sélection des sources initiales qui seront choisies pour télécharger puis disséminer les contenus. Nous optons pour une solution qui pourrait reposer sur technologie SDN ainsi que sur des communications opportunistes et qui permet de choisir les sources en tant que nœuds pouvant produire un maximum d'utilité en propageant les contenus.

Abstract

Vehicular networks are a class of mobile wireless networks and have the originality of enabling vehicles to communicate with each other and also with the infrastructure when it exists. The advent of vehicular networks has been accompanied by the emergence of a myriad and a variety of potential applications that are not only restricted to road safety but span from traffic management to entertainment and comfort applications. These applications have received much interest from researchers, automobile manufacturers, and telecommunications operators.

Information and entertainment applications, where a large amount of content can exist, require the dissemination of the generated content through vehicles and/or infrastructure until reaching interested users while respecting the potential limited lifetime of content. The content dissemination for this type of applications remains a major challenge due to several factors such as the presence of a large amount of content, an intermittent connectivity, and the heterogeneous interests of users.

In this thesis we turn our attention to this topic. First, we propose a new metric that allows to measure the users satisfaction with respect to the received content. This metric is used to evaluate the performance of the dissemination schemes.

Second, we focus on the development of a new dissemination protocol, named I-PICK, and a forwarder selection solution, named I-SEND, to disseminate information and entertaining content in vehicular networks while ensuring maximum satisfaction of the users preferences with respect to the received content. Our proposal is based on the exchange of periodic messages enabling the estimation of contact durations and the knowledge of user preferences. First of all, this information is used to conduct an efficient content scheduling during the dissemination, and then to select relay nodes for

maximizing the utility to users. We confirm the efficiency of our approach through simulations.

To strengthen the functioning of our mechanisms, we implemented our proposals I-PICK and I-SEND in a real environment. Through a simple scenario, we have highlighted the risks associated with the heterogeneity of the machines and even the difficulty of setting timers. These first positive results show the interest of our solutions and raise new questions to be addressed.

Our last contribution concerns cellular traffic offloading schemes by exploiting vehicular opportunistic communications. We study the seed-vehicles selection problem as the first step toward bootstrapping cellular traffic offloading for content dissemination in vehicular networks. We propose a solution that takes advantage from the presence of the SDN technology as well as vehicular opportunistic communications to select as seeds the nodes that can produce maximum utility when propagating the content.

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vii
Table des figures	xvi
Liste des tableaux	xvii
Liste des acronymes	xix
Introduction	1
A Motivations	1
B Contributions	3
Chapitre 1 Réseaux véhiculaires : Vue générale	7
1 Les composants d'un réseau véhiculaire	8
2 Technologies de communication	9
3 Architectures de communication	10
3.1 Architecture centralisée : communication Véhicule-à-Infrastructure V2I	10
3.2 Architecture distribuée : communication Véhicule-à-Véhicule V2V	11
3.3 Architecture hybride	11
4 Caractéristiques des réseaux véhiculaires	11

5	Domaines d'applications et contraintes	13
5.1	Applications de sécurité routière	13
5.2	Applications de gestion du trafic routier	14
5.3	Applications d'information et de divertissement	14
6	Conclusion	15
Chapitre 2 Dissémination de contenus : des réseaux mobiles DTN aux réseaux vé-		
	hiculaires	17
1	Réseau mobile tolérant au délai	17
1.1	Principales contraintes	18
2	La dissémination dans les réseaux mobiles DTN	22
2.1	Phases de la dissémination et classification des solutions existantes	23
2.1.1	Phase 1 : Génération des contenus	23
2.1.2	Phase 2 : Traitement des contenus	25
2.1.3	Phase 3 : Sélection des nœuds relais et réplication des contenus	26
2.1.4	Phase 4 : Ordonnancement des contenus	31
2.1.5	Phase 5 : Relayage des contenus	32
2.1.6	Phase 6 : Politique de suppression	33
2.1.7	Phase 7 : Métriques de performance	33
3	Les protocoles de dissémination conçus pour MSN conviennent-ils pour les VSN ?	35
4	Conclusion	38
Chapitre 3 Disséminer pour répondre aux intérêts des usagers routiers		41
1	Contraintes de la dissémination de contenus	41
2	Exemple de motivation	43
3	I-PICK : Dissémination fondée sur les durées de contacts et les intérêts des usagers	44
3.1	Système considéré	44
3.2	Formulation du problème	48
3.3	Description détaillée de I-PICK	49

3.3.1	Phase 1 : découverte de voisins et de leurs intérêts	49
3.3.2	Phase 2 : Ordonnancement des objets	50
3.3.3	Phase 3 : dissémination des objets	52
4	Évaluation des performances par simulations	52
5	Conclusion	60
Chapitre 4 I-SEND : Comment choisir les relais ?		61
1	Motivation	61
2	Illustration sur un exemple simple	62
3	I-SEND sélection de relais fondée sur l'utilité	64
3.1	Système considéré	65
3.2	Formulation du problème	65
3.3	Description détaillée de I-SEND	66
3.3.1	Phase 1 : Découverte de voisins et de leurs intérêts	66
3.3.2	Phase 2 : Estimation de l'utilité qu'un nœud peut apporter à ses voisins	68
3.3.3	Phase 3 : Envoi des objets	69
3.3.4	Phase 4 : Annulation et réception des objets	70
4	Évaluation des performances par simulations	70
4.1	Méthodologie suivie	70
4.2	Résultats	71
5	Conclusion	75
Chapitre 5 Étude et analyse d'expérimentations de I-PICK et I-SEND		77
1	Matériels et outils utilisés	77
1.1	Équipements utilisés	78
1.2	Implantation du DTN Bundle Protocol	81
2	Implantation et validation du fonctionnement de I-PICK et I-SEND	82
2.1	Modification de l'échange des messages de beacon	82
2.2	Expression des préférences	83

2.3	Synchronisation entre les nœuds voisins	85
2.4	Implantation	86
2.5	Scénario retenu	87
3	Discussion	91
4	Conclusion	93
Chapitre 6 Exploiter les communications V2V pour réduire le trafic cellulaire		95
1	Augmentation du trafic cellulaire ... <i>Offloading</i> via les communications opportunistes est une solution prometteuse	95
2	État de l’art des méthodes de sélection des sources initiales	98
3	Système considéré et problématique	100
4	Prédiction des futurs contacts dans les réseaux véhiculaires	101
5	SDN-SIEVE	103
5.1	Système considéré	103
5.2	Description de SDN-SIEVE	105
5.2.1	Collecte des informations des véhicules	106
5.2.2	Prédiction des futurs contacts	106
5.2.3	Estimation de l’utilité qu’un nœud peut produire et choix des sources	107
5.2.4	Téléchargement et dissémination de l’objet	108
5.3	Algorithme de SDN-SIEVE	108
5.4	Discussion	109
6	Évaluation des performances	111
6.1	Méthodologie suivie	111
6.2	Résultats	112
7	Discussion	115
8	Conclusion	116
Conclusion et Perspectives		119
A	Conclusion	119

B	Perspectives	121
B.1	Perspectives à court terme	121
B.2	Perspectives à plus long terme	122
	Liste des publications	125
	Bibliographie	126

Table des figures

1.1	Architecture centralisée	10
1.2	Architecture centralisée	11
1.3	Architecture centralisée	12
2.1	Les réseaux mobiles DTN pour la dissémination de contenus	19
2.2	Classification des solutions existantes selon les phases de la dissémination de contenus dans les réseaux mobiles DTN	24
3.1	Scénario de motivation	43
3.2	Présentation en couches du système considéré	45
3.3	Les phases de I-PICK	49
3.4	Carte d'Helsinki utilisée pour le modèle de mobilité	53
3.5	Scénario obtenu à partir des traces de Cologne	54
3.6	Taux d'utilité produit en fonction du temps	56
3.7	Taux d'utilité produit en fonction du nombre et de la taille des objets	57
3.8	Content Utility en fonction du nombre des véhicules	58
3.9	Distribution de <i>Zipf</i> : Impact de la capacité de stockage et du technique de rejet sur l'utilité	59
4.1	Scénario de motivation	62
4.2	Forwarder selection scheme	67
4.3	Modèle de mobilité : Taux d'utilité produit en fonction du temps	72
4.4	Traces réelles : Taux d'utilité produit en fonction du temps	73

4.5	Taux d'utilité produit en fonction de la taille des objets, de la capacité de stockage et du TTL	74
5.1	Trois machines Linux utilisées pour l'expérimentation	80
5.2	Architecture de IBR-DTN	82
5.3	Expression des intérêts pour les différentes thématiques	84
5.4	Exemple de préférences pour différentes thématiques	85
5.5	scénario réel avec des véhicules	88
5.6	scénario retenu avec des machines	88
6.1	Solutions utilisées pour l' <i>offloading</i> du réseau cellulaire	97
6.2	Software-defined vehicular networks	104
6.3	SDN-SIEVE phases	105
6.4	Illustration des contacts sur une période de temps	107
6.5	Faible densité : content utility produite en fonction du temps	113
6.6	Influence du TTL, de la taille des objets et du nombre de sources - faible densité . . .	114
6.7	Influence du TTL, de la taille des objets et du nombre de sources - forte densité . . .	115

Liste des tableaux

1.1	Récapitulatif des technologies de communication	9
1.2	Caractéristiques des applications des réseaux véhiculaires	15
2.1	Exemple de réseaux mobiles DTN	21
2.2	Solutions de dissémination proposées pour les réseaux mobiles DTN	36
3.1	Intérêts de V_1 et V_2	43
3.2	Notations utilisées	47
4.1	Préférences des nœuds	63
5.1	Caractéristiques des équipements mobiles	79
5.2	Caractéristiques des machines	80
5.3	préférences des voisins de dtn ://FAROUK	87
5.4	préférences des voisins de dtn ://ROGER	87
5.5	préférences des voisins de dtn ://IOANA	87
5.6	Temps d'exécution du script sur les différentes machines	89
6.1	<i>Content utility</i> en fonction de la période de prédiction des futurs contacts	112

Liste des acronymes

DAB Digital Audio Broadcasting.

DMB Digital Multimedia Broadcasting.

DSRC Dedicated Short-Range Communications.

DTN Delay Tolerant Network.

DTNRG Delay-Tolerant Networking Research Group.

DVB-H DVB-Handheld.

DVB-T DVB-Terrestrial.

EDGE Enhanced Data Rates for GSM Evolution.

GPRS General Packet Radio Service.

GPS Global Positioning System.

GSM Global System for Mobile communications.

I-PICK *contact LifesPan and Interest-based Content dissemination in vehicular networkK.*

I-SEND *utIility-baSEd forwarder selection for coNtent Dissemination in vehicular networks.*

ION Interplanetary Overlay Network.

JPL Jet Propulsion Laboratory.

LTE Long Term Evolution.

MSN Mobile Social Network.

OBU On-Board Unit.

RDS Radio Data System.

RSU RoadSide Unit.

SDN Software-Defined Networking.

SDN-SIEVE *SDN-based Seed selectIon scheme for maximally satisfying commutErs interests in Vehicular nEtworks.*

SDVN Software-Defined Vehicular Networking.

THE ONE THE Opportunistic Network Environment.

TMC Traffic Message Channel.

UMTS Universal Mobile Telecommunications System.

V2I vehicle-to-infrastructure.

V2V vehicle-to-vehicle.

VSN Vehicular Social Network.

WSN Wireless Sensor Network.

Introduction

A Motivations

Au cours de cette dernière décennie, les réseaux sans fil ont connu un développement rapide avec une prolifération d'équipements mobiles. Cela s'est accompagné d'une évolution des paradigmes de communication. Initialement, les nœuds (i.e. les appareils mobiles) communiquaient en utilisant des technologies sans fil à longue portée, tels que le [Global System for Mobile communications \(GSM\)](#), [General Packet Radio Service \(GPRS\)](#) et [Universal Mobile Telecommunications System \(UMTS\)](#), au travers d'infrastructures d'opérateurs. Par la suite, avec l'essor du déploiement des technologies sans fil à courte portée (e.g. Bluetooth, WiFi), les nœuds ont été en mesure de communiquer avec des infrastructures plus légères puis directement entre eux en utilisant leur technologie sans fil à courte portée de manière *ad hoc*, le recours à une infrastructure préexistante n'est plus obligatoire.

Dans ce contexte, les réseaux véhiculaires ont émergé en tant que nouvelle technologie prometteuse permettant aux véhicules de communiquer les uns avec les autres ainsi qu'avec l'infrastructure installée au bord de la route. Les réseaux véhiculaires sont apparus en premier avec le besoin de développer des applications permettant de renforcer la sécurité routière afin de réduire le nombre d'accidents de la route et ainsi d'améliorer la gestion du trafic routier qui continue à croître. Jusqu'à présent, ces applications ont été largement étudiées dans le cadre de projets à l'échelle nationale et internationale. Par ailleurs, il existe également des applications d'information et de divertissement visant à offrir plus de confort et de convivialité aux conducteurs et aux passagers pendant leurs trajets. Ce type d'applications attire de plus en plus l'attention des chercheurs, des constructeurs

automobiles et des opérateurs des télécommunications. C'est à ce type d'applications que nous nous intéressons dans cette thèse. En effet, si les applications de sécurité ont donné lieu à une littérature abondante, les applications de confort n'ont pas encore reçu l'attention qu'elles méritent en particulier pour ce qui concerne les spécificités fondamentales des réseaux véhiculaires : durées de contact très courtes, très forte dynamicité. Parmi ces applications, on retrouve des applications publicitaires des fournisseurs de services qui désirent attirer les usagers routiers vers leurs magasins ; par exemple une station-service annonçant ses tarifs de carburant ou un restaurant situé au bord de l'autoroute désirant informer les voyageurs de son offre de repas du jour. Cela permet aux usagers de la route d'être informés de plusieurs services et informations concernant leur environnement proche sans avoir besoin de s'arrêter ou de descendre de leur véhicule. Vu le grand volume de contenus qui peut être présent dans le réseau, les usagers routiers ne seront pas intéressés par toutes ces informations, mais uniquement par les contenus qui correspondent à leurs propres préférences.

Les paradigmes de communication ont été initialement fondés sur l'hypothèse d'une connectivité continue de bout en bout entre les nœuds. Toutefois, en raison de la mobilité des nœuds et de la limitation des ressources des appareils mobiles, la connectivité des nœuds peut souffrir d'interruptions fréquentes pendant des périodes de temps relativement longues. Afin de permettre la communication entre les nœuds dans de tels environnements, une nouvelle forme de réseaux, connue sous le nom des réseaux mobiles tolérants aux délais (*Mobile Delay Tolerant Networks (DTNs)*) [PCR⁺12, IRD⁺13, SFR09, CFBF11, BSB⁺14], a été introduite permettant le développement de nouvelles applications où la connectivité continue de bout en bout peut ne pas être possible. Dans ce cas, les nœuds mobiles peuvent communiquer et échanger des informations d'une manière opportuniste, grâce au mécanisme « *store, carry and forward* ». Ce mécanisme permet de surmonter le problème des connexions intermittentes, du fait qu'un nœud peut stocker l'information tout au long de son trajet, et par la suite la transmettre aux autres nœuds lorsque l'occasion se présente (i.e. quand une connectivité apparaît).

Les réseaux Mobile DTNs sont apparus initialement dans le contexte des communications spatiales. Depuis, d'autres domaines d'applications ont émergé comme les réseaux véhiculaires, les réseaux militaires, les réseaux de capteurs et les réseaux *ad hoc*. Ces réseaux ont en commun le fait

qu'ils ne peuvent pas être sûrs de bénéficier d'un lien de communication fiable permanent. En revanche, chacun possède ses spécificités, caractéristiques et applications, nécessitant ainsi ses propres mécanismes et solutions pour lever les différents verrous rencontrés. En particulier, les réseaux véhiculaires, auxquels nous nous intéressons, se différencient nettement des autres réseaux mobiles DTNs. Nous pouvons citer à titre d'exemple la mobilité des véhicules qui peut être prévisible en raison des routes prédéfinies (e.g. autoroutes). Une autre caractéristique importante des réseaux véhiculaires est le potentiel énergétique. En effet les entités des réseaux véhiculaires disposent de grandes capacités qu'elles tirent du système d'alimentation des véhicules. Outre ces caractéristiques, les applications potentielles proposées pour les réseaux véhiculaires telles que la sécurité routière, le guidage, le recherche de places de parking font également de ces derniers un environnement très spécifique.

Cependant, les caractéristiques du réseau véhiculaire (e.g. forte mobilité des véhicules qui induit de faibles durées de contacts, densité variable du réseau) ainsi que les contraintes de ces applications rendent compliquée la résolution des verrous rencontrés. La dissémination de contenus, qui comprend plusieurs étapes allant de la création des contenus jusqu'à leur relayage, leur propagation et la définition de leurs métriques de performances, est un des défis majeurs rencontrés dans ces réseaux ; c'est à ce sujet plus spécifiquement que nous consacrons la présente thèse. Par conséquent, notre objectif est de concevoir des techniques de dissémination particulièrement adaptées aux réseaux véhiculaires permettant de répondre aux besoins des usagers routiers ainsi qu'aux contraintes du réseau.

B Contributions

Tout au long de ce travail, nous nous intéressons à garantir la satisfaction des usagers routiers qui a été peu explorée dans l'état de l'art. Notre objectif consiste donc à effectuer la dissémination de contenus dans les réseaux véhiculaires en répondant aux questions suivantes :

- *Comment disséminer les contenus pour satisfaire les intérêts des utilisateurs ?*
- *Quels nœuds choisir pour relayer les contenus vers les autres nœuds ?*
- *Quelle serait la bonne méthode pour réduire le trafic du réseau cellulaire en utilisant les communications *vehicle-to-vehicle* (V2V) ?*

Tout au début de cette thèse, nous proposons un état de l'art et une taxonomie des protocoles de dissémination. Cette classification nous a amenés à définir une nouvelle métrique quantitative « *content utility rate* » qui sera utilisée pour évaluer les performances des techniques de dissémination conçues pour les applications de divertissement. Elle est calculée en fonction des intérêts des usagers routiers et permet de déterminer le niveau de satisfaction des utilisateurs à l'issue de la dissémination des contenus. Une technique de dissémination efficace devra alors maximiser cette valeur du « *content utility* ».

Nous entamons alors la deuxième étape de la thèse au cours de laquelle nous proposons un nouveau protocole de dissémination de contenus, nommé I-PICK, adapté aux applications d'information et de divertissement visant à maximiser la satisfaction des intérêts des utilisateurs. Pour ce faire, ce protocole prend en compte les paramètres des utilisateurs (i.e. préférences des utilisateurs) ainsi que les paramètres du réseau (i.e. durées de contacts entre les véhicules). I-PICK permet de répondre aux questions suivantes : Quels objets disséminer ? Dans quel ordre ? et apporte ainsi une solution qui permet d'augmenter la satisfaction des intérêts des usagers routiers. Nous validons cette proposition par simulation en montrant qu'I-PICK pourrait apporter des gains significatifs en termes de satisfaction des utilisateurs.

Pour compléter cette proposition, notre troisième contribution introduit une nouvelle approche, nommée I-SEND, de sélection de relais qui répond à la question suivante : « comment choisir les nœuds relais afin de satisfaire au maximum les intérêts des utilisateurs dans un minimum de temps ». Nous montrons par simulation que pour répondre aux préférences des utilisateurs, il ne serait pas forcément efficace de choisir les relais qui permettent d'envoyer le maximum d'objets, mais au contraire, les relais devront être les plus utiles aux autres utilisateurs.

Pour mettre en valeur ces travaux, nous avons effectué alors une étude expérimentale sur un exemple de scénario simple. Cela nous a permis tout d'abord d'appréhender le fonctionnement de nos solutions sur les couches basses puisque notre environnement de simulation est adapté à des analyses sur des protocoles de niveau assez élevé. Par ailleurs, cette expérimentation nous a permis d'étudier et d'analyser des enjeux majeurs liés à l'hétérogénéité des équipements utilisés ainsi que le paramétrage des temporisations.

Le nouveau paradigme de communication des réseaux véhiculaires peut être utile non seulement aux usagers routiers, mais aussi aux réseaux cellulaires. De nos jours, plusieurs applications utilisent les réseaux cellulaires pour la transmission des contenus. Leur prolifération risque d'augmenter et par conséquent de surcharger les réseaux cellulaires. Dans ce contexte, les communications directes entre les véhicules peuvent être utilisées pour délester le trafic cellulaire. En effet, un petit nombre de véhicules pourraient télécharger les contenus par l'intermédiaire des réseaux cellulaires puis les propager en utilisant les communications [V2V](#).

Une partie de notre proposition, intitulée SDN-SIEVE, est centralisée et peut être ainsi déployée dans un un environnement tel que le [Software-Defined Networking \(SDN\)](#). SDN-SIEVE considère les intérêts des nœuds ainsi que leurs futurs contacts pour choisir les sources initiales appropriées permettant ainsi de satisfaire les intérêts des nœuds avant l'expiration des durées de vie des contenus.

CHAPITRE 1

Réseaux véhiculaires : Vue générale

Sommaire

1	Les composants d'un réseau véhiculaire	8
2	Technologies de communication	9
3	Architectures de communication	10
3.1	Architecture centralisée : communication Véhicule-à-Infrastructure V2I	10
3.2	Architecture distribuée : communication Véhicule-à-Véhicule V2V	11
3.3	Architecture hybride	11
4	Caractéristiques des réseaux véhiculaires	11
5	Domaines d'applications et contraintes	13
5.1	Applications de sécurité routière	13
5.2	Applications de gestion du trafic routier	14
5.3	Applications d'information et de divertissement	14
6	Conclusion	15

Au cours de ces dernières années, les avancées continues réalisées dans les technologies de communication sans fil ont déclenché l'apparition d'un grand nombre de nouveaux réseaux visant à étendre la connectivité dans les environnements où les solutions filaires ne sont pas toujours déployables. En tant que tels, les réseaux véhiculaires se présentent comme un domaine de recherche prometteur qui attire de plus en plus l'attention des chercheurs, des constructeurs automobiles et des opérateurs des télécommunications. Ces réseaux véhiculaires rendent possible la communication entre les véhicules et l'on peut nourrir l'espoir qu'ils permettront de réduire le temps passé sur les routes, de le rendre plus convivial et plus encore d'améliorer la sécurité routière.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la dissémination de contenus dans les réseaux véhiculaires. Pour cela, dans ce premier chapitre, une vue globale sera présentée sur les réseaux véhiculaires en se limitant aux aspects qui concernent directement la dissémination.

Dans ce qui suit, nous débuterons par la description des composants, technologies, et architectures de communication utilisés dans les réseaux véhiculaires. Par la suite, nous présentons les principales

applications de monde véhiculaire ainsi que leurs contraintes. Pour chaque type d'application, nous recensons les objectifs et défis à relever pour une dissémination de contenus efficace.

1 Les composants d'un réseau véhiculaire

Les principaux composants qui constituent un réseau véhiculaire sont les suivants :

- **Les usagers routiers** : dans les réseaux véhiculaires, les conducteurs et les passagers peuvent participer aux communications. Ces utilisateurs peuvent jouer le rôle de consommateur, de fournisseur de contenus ou les deux à la fois. De nos jours, le nombre d'accidents de la route et d'infractions à la circulation augmente en raison de l'utilisation des équipements mobiles et des équipements embarqués dans les véhicules. Par conséquent, il est nécessaire de prévoir un mécanisme qui réduise sensiblement l'interaction du conducteur avec les dispositifs de bord lors du partage de contenus. À titre d'exemple, une architecture a été proposée qui consiste à partager automatiquement des informations détectées par les capteurs dans les véhicules [LLM10].
- **L'équipement mobile** : les véhicules sont équipés d'**On-Board Units (OBUs)** permettant de détecter les utilisateurs à proximité, de communiquer et de partager des contenus avec eux. Pendant ces dernières années, plusieurs projets européens et internationaux ont montré, avec des prototypes et des expérimentations, la faisabilité et l'importance des communications véhiculaires dans le cadre de plusieurs applications. Il est ainsi prévu que le taux de déploiement des véhicules équipés d'**OBUs** augmentera pendant les 15 prochaines années.
- **L'infrastructure** : certaines applications conçues pour les réseaux véhiculaires sont centralisées ou utilisent l'infrastructure quand cette dernière existe. Globalement, les infrastructures qui peuvent être utilisées dans les réseaux véhiculaires sont les **RoadSide Units (RSUs)** et les réseaux cellulaires. D'une part, les **RSUs** offrent des communications à courte portée et restent peu déployées en raison de leur coût élevé. D'autre part, les réseaux cellulaires offrent des communications à longue portée le plus souvent coûteuses.

2 Technologies de communication

Afin de déployer les applications proposées pour les réseaux véhiculaires, différentes technologies de communication existent. Ces technologies peuvent être divisées principalement en trois catégories :

- **Radio diffusion numérique** : telles que [Radio Data System \(RDS\)](#)/[Traffic Message Channel \(TMC\)](#), [Digital Audio Broadcasting \(DAB\)](#)/[Digital Multimedia Broadcasting \(DMB\)](#) et [DVB-Terrestrial \(DVB-T\)](#)/[DVB-Handheld \(DVB-H\)](#), dans laquelle les informations sont fournies aux utilisateurs d'une manière unidirectionnelle.
- **Réseaux cellulaires** : on peut citer comme exemple l'[Enhanced Data Rates for GSM Evolution \(EDGE\)](#), [UMTS](#), [Long Term Evolution \(LTE\)](#) et [WiMax](#) qui dominent le domaine des communications mobiles et offrent des couvertures très larges mais nécessitent en revanche une infrastructure.
- **Device-to-Device** : cette catégorie permet une communication directe entre les véhicules en utilisant des technologies telles que le [WiFi](#) et [Dedicated Short-Range Communications \(DSRC\)](#).

Le tableau 1.1 présente une variété de caractéristiques pour des technologies de communications utilisées dans les réseaux véhiculaires.

TABLE 1.1 – Récapitulatif des technologies de communication

Technologies	Coût	Couverture	Débit	Taux de pénétration	Mode de transmission
WiMax	élevé	≈ 50 km	70 Mbit/s	faible	V2I
WiFi	abordable	≈ 100 m–200 m	11 Mbit/s–300Mbit/s	élevé	V2V, V2I
DSRC	abordable	≈ 100 m–1 km	3-27 Mbit/s	faible	V2V, V2I
3G/4G	abordable	\approx milliers de km	200 Kbit/s–100 Mbit/s	élevé	V2I

3 Architectures de communication

Selon la manière avec laquelle les usagers routiers sont en mesure d'accéder et de partager les contenus, les réseaux véhiculaires peuvent être classés en trois types d'architectures [MDNB14] : (i) centralisée, (ii) décentralisée et (iii) hybride.

3.1 Architecture centralisée : communication Véhicule-à-Infrastructure V2I

L'architecture centralisée, comme illustré dans la figure 1.1, fonctionne sous l'hypothèse que les utilisateurs doivent continuellement accéder à un serveur centralisé qui gère leurs interactions avec d'autres utilisateurs, même lorsque les véhicules sont physiquement proches. Dans une telle architecture, il n'y a pas d'interaction directe entre les véhicules. Dans la littérature, cette communication est connue sous le nom de **vehicle-to-infrastructure (V2I)**. Les véhicules communiquent indirectement par l'intermédiaire des infrastructures existantes telles que les **RSUs** et les réseaux cellulaires. Jusqu'à ce jour, les **RSUs** sont peu déployés en raison de leur coût élevé. De plus les réseaux cellulaires sont surchargés avec l'augmentation de la demande et ne couvrent pas toutes les zones (e.g. tunnels ou zones rurales).

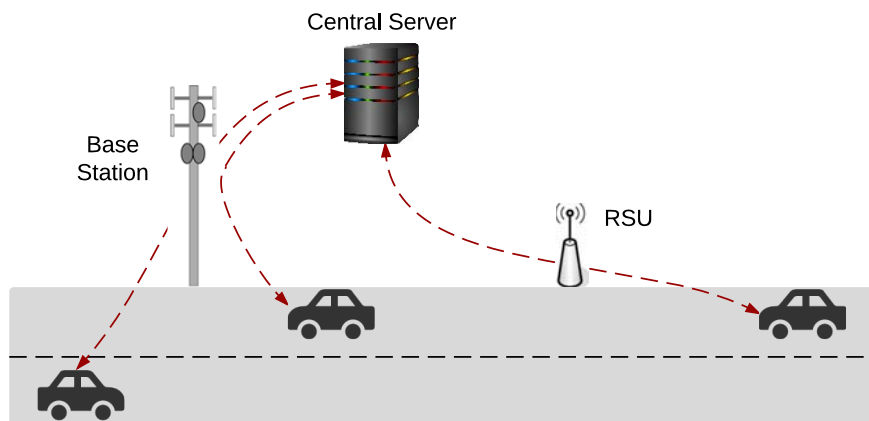


FIGURE 1.1 – Architecture centralisée

3.2 Architecture distribuée : communication Véhicule-à-Véhicule V2V

L'architecture décentralisée illustré sur la figure 1.2, comprend uniquement des communications opportunistes entre les véhicules. Quand un véhicule rencontre d'autres véhicules à proximité (i.e. des nœuds voisins), les utilisateurs peuvent alors communiquer et échanger des contenus pendant les durées de contacts **V2V**. La communication **V2V** n'est pas coûteuse et offre un débit de transmission important. En revanche, cette communication pose des défis tels que les faibles fréquences de contacts entre les véhicules dans un milieu à faible densité, les faibles durées de contacts en raison de la vitesse et de la qualité du lien, et la sélection des nœuds relais.

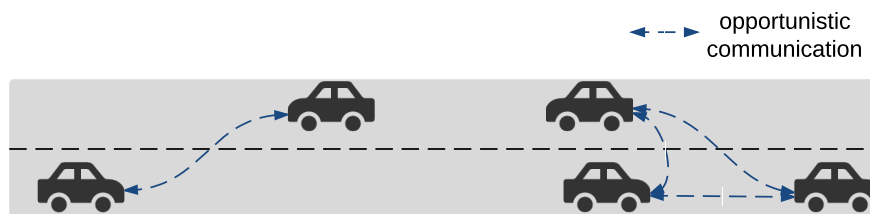


FIGURE 1.2 – Architecture centralisée

3.3 Architecture hybride

L'architecture hybride, que nous présentons sur la figure 1.3, comprend à la fois des communications **V2V** et des communications **V2I**. L'infrastructure peut être utilisée d'une manière optionnelle ou quand elle est présente. Dans les zones où l'infrastructure est inexistante, cette architecture opte pour des communications directes entre les véhicules.

4 Caractéristiques des réseaux véhiculaires

Les réseaux véhiculaires ont des caractéristiques et des spécificités qui rendent cet environnement particulier et unique par rapport aux autres réseaux sans fil mobiles [RP09, MSJ09]. Voici quelques propriétés qui distinguent les réseaux véhiculaires :

- **Topologie du réseau et densité** : contrairement à la plupart des réseaux sans fil mobiles, les réseaux véhiculaires sont caractérisés par une forte mobilité, liée à la grande vitesse des

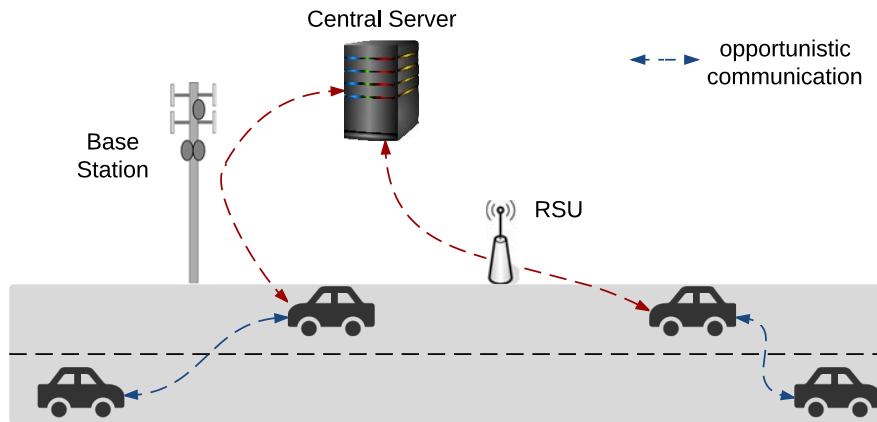


FIGURE 1.3 – Architecture centralisée

véhicules en particulier sur les autoroutes. Par conséquent, un nœud peut rejoindre et quitter le réseau en un laps de temps très court, ce qui rend la topologie très instable. En outre, la densité du réseau peut varier en fonction du milieu (i.e. urbain, rural, autoroutes) et en fonction de l'heure de la journée (e.g. une faible densité à une heure tardive de la nuit). Pour cela, les protocoles conçus pour les réseaux véhiculaires doivent relever ce défis de variation de densité.

- **Modèle de mobilité et distribution des véhicules** : la topologie du réseau véhiculaire est dynamique mais la mobilité des véhicules est contrainte par des chemins (i.e. les rues et les routes) prédéfinis, par les directions de déplacement et par le nombre des voies sur les routes. Les trajectoires des véhicules sont assez prévisibles à l'échelle de la portée des équipements. L'environnement d'un réseau véhiculaire peut être urbain, rural ou autoroutier. Les contraintes imposées par ce type d'environnements telles que les feux de circulation et les limitations de vitesses affectent fortement la mobilité et la densité des véhicules.
- **Le potentiel énergétique** : Au contraire des réseaux sans fil traditionnels où la contrainte d'énergie représente un facteur limitant important, les entités des réseaux véhiculaires disposent de grandes capacités énergétiques qu'elles tirent du système d'alimentation des véhicules. Pour cela, nous pouvons considérer que les équipements **OBUs** ne disposent pas de limite énergétique très forte.

- **Le passage à l'échelle** : les réseaux véhiculaires peuvent croître rapidement, notamment dans les zones urbaines où les intersections et les routes à voies multiples sont fréquentes. Par conséquent, les protocoles proposés doivent faire face au passage à l'échelle qui se matérialisera par exemple par un grand nombre de collisions possibles sur le support de communication et des interférences entre les nœuds pendant leurs transmissions.

Au-delà des caractéristiques introduites ci-dessus, les réseaux véhiculaires se distinguent également par une variété d'applications spécifiques. Dans ce qui suit nous recensons les types d'applications possibles.

5 Domaines d'applications et contraintes

Les applications conçues pour les réseaux véhiculaires peuvent être principalement classifiées sur trois catégories [[MDNB14](#), [KAE⁺11](#), [TML08](#), [HL08](#)] : (i) les applications de sécurité routière, (ii) les applications de gestion du trafic routier et (iii) les applications d'information et de divertissement. Dans la suite, nous allons détailler chacun de ces types en précisant leurs objectifs et leurs contraintes.

5.1 Applications de sécurité routière

Ces applications visent à réduire le nombre des accidents et à améliorer la sécurité routière en fournissant aux usagers routiers des informations pertinentes et utiles telles que l'avertissement de collision, la présence d'obstacles sur la route et l'avertissement d'un véhicule d'urgence qui approche. Cette catégorie d'applications est très critique en termes de délai. Ce contexte temps réel a des impacts sur les techniques de communication proposées. Détecter le danger qui menace la vie des conducteurs, informer les usagers routiers dans les plus brefs délais afin qu'ils puissent réagir rapidement constituent des défis liés à ces applications.

Comme exemple de ce type d'applications, nous pouvons citer l'application qui consiste à faciliter le passage des véhicules d'urgence. Actuellement, les ambulances utilisent les sirènes pour avertir les véhicules rencontrés. Cette méthode peut être accompagnée d'une information diffusée par l'ambulance qui peut être propagée au travers des autres véhicules qui seront alors avertis beaucoup plus

tôt, ce qui peut aider à faciliter le passage des ambulances.

Un autre exemple est l'avertissement des dangers de la route tels que les obstacles, le brouillard, des travaux etc... En présence d'un danger sur la route, une information peut alors être partagée entre les véhicules afin de les avertir. Cela permet aux conducteurs de réagir plus tôt et réduit les risques d'accidents.

5.2 Applications de gestion du trafic routier

Les applications de cette catégorie utilisent les communications entre véhicules afin de partager des informations de trafic et ainsi d'améliorer le trafic routier en considérant des informations telles que des travaux, des obstacles ou des embouteillages potentiels. Cela permet la réduction du temps de trajet et une répartition efficace du trafic routier. Informer préalablement et rapidement les usagers routiers d'incidents possibles sur la route leur permet de changer leurs trajets et de les éviter. Ces applications sont moins exigeantes en termes de délai de délivrance que les applications de sécurité.

Comme exemple d'application, nous pouvons citer l'application qui aide les conducteurs à choisir les meilleurs itinéraires. Par exemple, les travaux de construction ou des incidents survenus causent généralement des embouteillages et des encombrements de la circulation. Informer préalablement (avant que les véhicules empruntent la route où l'incident a eu lieu) les usagers routiers de ces incidents leur permet de changer de trajet et d'éviter les embouteillages.

5.3 Applications d'information et de divertissement

L'objectif principal de cette catégorie d'applications est de fournir aux usagers routiers des informations, des publicités et du divertissement au cours de leurs trajets. Ces applications ont pour objectif d'améliorer le confort des conducteurs et des passagers. À titre d'exemple, on peut citer des applications qui fournissent aux utilisateurs des informations sur les stations-service à proximité ou l'offre d'un restaurant au bord de l'autoroute. Les utilisateurs n'ont alors plus besoin de s'arrêter. Ils peuvent profiter de ces offres quand elles les intéressent. De plus, ces applications peuvent fournir un accès Internet, des messages instantanés, des jeux et d'autres services. Elles sont plus tolérantes aux délais que les précédentes. Elles visent à offrir des services de confort aux usagers routiers. En

revanche, ces applications doivent répondre aux préférences des usagers routiers.

TABLE 1.2 – Caractéristiques des applications des réseaux véhiculaires

<i>Type d'application</i>	<i>Type de contenus</i>	<i>Taille des contenus</i>	<i>Métrique d'évaluation</i>
Sécurité routière	Texte	petite	DD
Gestion du trafic routier	Texte	petite	DD, TD
Information et divertissement	Texte/Image	petite	TD pour les utilisateurs intéressés
	Audio	moyenne	QoS et TD pour les utilisateurs intéressés
	Video	grande	QoS et TD pour les utilisateurs intéressés

[DD] Délai de Délivrance

[TD] Taux de Délivrance

[QoS] Qualité de Service

Le tableau 1.2 résume les caractéristiques liées aux différents types d'applications envisagées pour les réseaux véhiculaires. Pour les applications de sécurité routière et de gestion du trafic routier, les contenus diffusés et échangés entre les utilisateurs sont généralement de petite taille et on s'intéresse au délai et au taux de délivrance pour évaluer les performances. Les applications de gestion du trafic routier sont moins exigeantes en termes de délai que les applications de sécurité. Pour les applications d'informations et de divertissement, différents types de contenus peuvent exister tels que des images, de l'audio ou une vidéo et par conséquent plusieurs tailles de contenus sont possibles (e.g. une dizaine de KB à 1MB pour les textes et images ; de 1MB à 10MB pour l'audio ; d'une dizaine de MB à une centaine de MB pour les vidéos). Ce type d'applications est plus tolérant au délai mais doit répondre aux attentes des usagers routiers.

6 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était de présenter les réseaux véhiculaires comme un nouveau paradigme de réseau. Nous avons présenté leurs caractéristiques ainsi que les différentes architectures de communication possibles. Les réseaux véhiculaires offrent une multitude d'applications allant de

la sécurité de la route au confort et au divertissement des usagers routiers. Nous avons classifié ces applications des réseaux véhiculaires en fonction de leur impact sur le trafic routier et des exigences en termes de délais et de services. Dans cette thèse, nous nous intéressons à la dissémination de contenus dans les réseaux véhiculaires. Pour cela, nous étudions les protocoles de dissémination conçus pour les réseaux mobiles [DTN](#).

CHAPITRE 2

Dissémination de contenus : des réseaux mobiles DTN aux réseaux véhiculaires

Sommaire

1	Réseau mobile tolérant au délai	17
1.1	Principales contraintes	18
2	La dissémination dans les réseaux mobiles DTN	22
2.1	Phases de la dissémination et classification des solutions existantes	23
2.1.1	Phase 1 : Génération des contenus	23
2.1.2	Phase 2 : Traitement des contenus	25
2.1.3	Phase 3 : Sélection des nœuds relais et réplication des contenus	26
2.1.4	Phase 4 : Ordonnancement des contenus	31
2.1.5	Phase 5 : Relayage des contenus	32
2.1.6	Phase 6 : Politique de suppression	33
2.1.7	Phase 7 : Métriques de performance	33
3	Les protocoles de dissémination conçus pour MSN conviennent-ils pour les VSN ?	35
4	Conclusion	38

1 Réseau mobile tolérant au délai

Les réseaux de communication ont toujours reposé sur des connectivités continues de bout-en-bout. Cela est naturel quand le premier service fourni était la conversation interactive de voix. Le paradigme de connectivité continue a été possible dans les réseaux filaires à faible coût. Au contraire, ce n'est pas toujours le cas pour les réseaux sans fil mobiles pour lesquels il pourrait être impossible ou non rentable de fournir partout des connexions sans interruption. De ce fait, il y aura des intermittences qui se produisent en raison de la couverture insuffisante des zones où se situent les

nœuds mobiles. Un nouveau type de réseaux est donc apparu, les *Mobile DTNs* [MHM⁺12, Fa103], caractérisé par une connectivité intermittente entre les nœuds; c'est à ces derniers que nous allons nous intéresser dans cette thèse.

Dans la littérature, les réseaux mobiles tolérants aux délais figurent sous différentes terminologies comme *Mobile Disruption/Delay Tolerant Network* et *Intermittently Connected Mobile Networks*. Les réseaux mobiles DTN sont des réseaux sans fil où les intermittences des connexions peuvent se produire fréquemment en raison de plusieurs facteurs tels que : les phénomènes de propagation, l'insuffisance des ressources énergétiques et encore plus souvent la mobilité des nœuds. Pour remédier au problème des intermittences entre les nœuds mobiles, les communications dans les réseaux mobiles DTNs sont souvent effectuées en utilisant la technique dite de « *store, carry and forward* ». Le principe de cette technique consiste à ce qu'un nœud puisse stocker et transporter un message pendant un certain temps avant de le transmettre vers un autre nœud qui survient dans sa portée de transmission. Par conséquent, les contenus sont transportés et échangés au fur et à mesure des déplacements des nœuds.

Depuis que le concept des réseaux DTN a été introduit, une grande attention a été portée sur les communications point-à-point dans le but de bâtir des protocoles de routage efficaces en termes de délai/taux de délivrance de la source à la destination ainsi que d'utilisation des ressources du réseau et des appareils mobiles. Plus récemment, des recherches se sont focalisées sur la dissémination de contenus dans les réseaux mobiles DTN, en se fondant sur les communications point-à-multipoint, permettant de partager et d'échanger les contenus entre les nœuds. Dans ce mémoire, nous nous intéressons en particulier à la dissémination de contenus dans les réseaux mobiles DTN.

1.1 Principales contraintes

Les réseaux mobiles DTN sont des réseaux sans fil qui ne sont pas conformes aux hypothèses classiques des réseaux informatiques ou de télécommunications. En particulier, ils sont caractérisés principalement par les spécificités suivantes :

- **nœuds mobiles** : La mobilité des nœuds d'un réseau mobile DTN peut être classifiée en trois catégories :

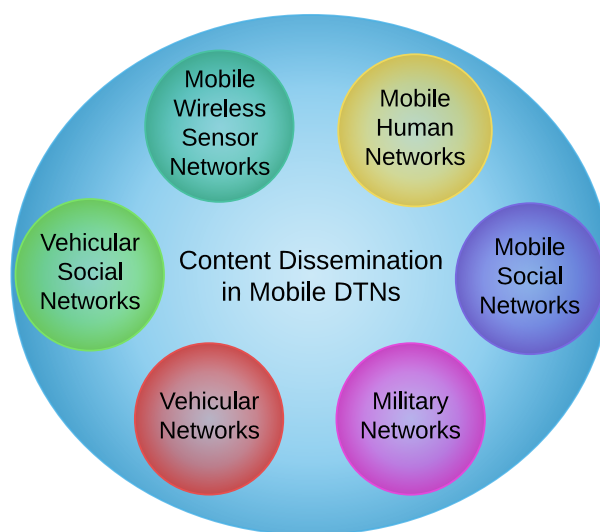


FIGURE 2.1 – Les réseaux mobiles DTN pour la dissémination de contenus

- (i) mobilité réduite : comme c'est le cas pour les nœuds d'un *underwater sensor networks* qui se déplacent avec une vitesse de 0.5m/s [VKR⁺05].
 - (ii) faible mobilité : à titre d'exemple les personnes des *mobile human networks* marchent avec une vitesse moyenne de 1.34 m/s [KKK06].
 - (iii) forte mobilité : on peut citer l'exemple concret des véhicules sur les routes qui circulent avec des vitesses moyennes comprises entre 14 m/s et 30 m/s.
- **Une connectivité intermittente** : la connectivité entre les nœuds est intermittente ce qui cause le partitionnement du réseau en de nombreux îlots. Cette intermittence est due à plusieurs facteurs tels que la mobilité des nœuds et l'insuffisance de ressource énergétique.
 - **Contacts entre les nœuds** : les contacts entre les nœuds d'un réseau DTN peuvent être :
 - (i) prédits en utilisant les horaires et les itinéraires de déplacement des véhicules (e.g. réseau de bus) ou en utilisant les fréquences de contacts (e.g. collègues de travail).
 - (ii) opportunistes lorsque les chemins parcourus et les destinations des nœuds changent fréquemment, on peut alors citer le cas des taxis ou bien encore celui des zèbres équipés de capteurs. Par conséquent, il est difficile de prévoir un futur contact entre deux nœuds.
 - **Ressources limitées** : Généralement les appareils mobiles d'un réseau mobile DTN ont des

ressources limitées. Cela se traduira par une faible capacité énergétique (e.g. smartphones, capteurs) qui doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du nœud dans le réseau. En outre, la plupart des appareils mobiles ont des capacités de stockage limitées qui ne permettent de stocker qu'un volume de contenus restreint. De plus, la faible portée de transmission et les déplacements potentiellement rapides ne permettent pas de maintenir un lien de communication que pendant une courte durée.

- **Longs délais** : En raison des fréquentes intermittences et de la forte mobilité des nœuds, la propagation des contenus peut prendre des délais très longs.
- **Comportement égoïste des nœuds** : Certains nœuds peuvent être égoïstes et par conséquent ne désirent pas coopérer et échanger des informations avec les autres nœuds. Cela peut être influencé par différents facteurs tels que : la minimisation de la consommation d'énergie, la faible capacité de stockage et le comportement personnel de l'utilisateur. Par conséquent, il sera nécessaire de trouver des mécanismes pour inciter les nœuds à coopérer.

Le tableau 2.1 présente un récapitulatif des caractéristiques de différents réseaux mobiles DTN.

TABLE 2.1 – Exemple de réseaux mobiles DTN

	Exemple de nœuds	mobilité des nœuds	capacité de stockage	ressource énergétique	prédiction des contacts	égoïsme des nœuds
mobile human networks	social users [ZVID11]	régulière	limitée (quelques GB pour les smartphones)	faible	possible en utilisant l'historique des contacts sur une longue échelle temporelle (e.g. les collègues de bureau se rencontrent chaque jour)	dépend de la volonté de l'utilisateur de coopérer et est influencé par des facteurs comme la limitation de l'énergie et de la mémoire de stockage [ZWZ+13]
	non-social users [ZVID11]	aléatoire			difficile	
vehicular networks	bus [CLGH10]	pré-définie (horaires et routes prédéterminés)	Capacité importante (centaine de GB)	Capacité énergétique importante qui tire sa justification du système d'alimentation du véhicule	les bus ont des itinéraires et des horaires dédiés, par conséquent, des contacts constants et stables.	la coopération entre les nœuds dépend principalement de la volonté l'utilisateur routier
	taxis [CLGH10]	aléatoire			aléatoire puisque le mouvement des taxis dépend des destinations demandées par les clients	
	véhicules privés [CLGH10]	peut être régulière (e.g. déplacements au travail, à l'école, au domicile), ou opportuniste (e.g. visite d'un nouvel endroit)			il est plus compliqué de prédire les contacts en utilisant les historiques de communications. Possibilité de prévoir les futurs contacts en utilisant l'itinéraire des nœuds sur une courte échelle de temps (e.g. deux véhicules qui circulent dans le sens opposé d'une autoroute)	
Mobile sensor networks	Zebrant [JOW+02]	aléatoire selon le mouvement des zèbres	très limitée (quelques MB)	faible	difficile	coopération entre les nœuds s'ils appartiennent à la même organisation. Comportement égoïste des nœuds ne faisant pas partie de la même organisation et/ou liée aux contraintes d'énergie et de stockage [CQLX11]
	drones [QKW+10] robots terrestres [RKM09]	programmable			une connaissance des trajets à parcourir à l'avance permet de déterminer les futurs contacts	

2 La dissémination dans les réseaux mobiles DTN

Avec le progrès des technologies sans fil et la prolifération des appareils mobiles, un grand volume de contenus est créé chaque jour. Concevoir un protocole de dissémination efficace dans les réseaux mobiles DTN constitue toujours un réel défi. La difficulté provient de la topologie du réseau très variable et instable ainsi que de l'apparition et de la disparition dynamique des utilisateurs dans le réseau. Par conséquent, les contenus devraient être transportés, dupliqués dans le réseau afin d'être transmis aux nœuds concernés malgré les connexions intermittentes et le partitionnement du réseau. Qui plus est, la dissémination de contenus doit être efficace en termes d'utilisation des ressources du réseau ainsi que de celles des appareils mobiles.

L'incertitude sur les conditions du réseau dans un environnement mobile DTN couplée aux ressources limitées (e.g. capacité de stockage, limitation de l'énergie, portée limitée) des appareils mobiles (e.g. capteur, OBU, smartphone) font de la dissémination de contenus un enjeu fondamental dans les réseaux mobiles DTN. Récemment, plusieurs approches de dissémination de contenus ont été proposées dans différents environnements DTN mobiles comme illustré dans la figure 2.1. Parmi les scénarios de dissémination de contenus dans les réseaux mobiles DTN, nous pouvons citer :

- *Mobile Wireless Sensor Networks (WSNs)* : la plupart des systèmes de réseaux de capteurs, une fois déployés, sont destinés à effectuer des opérations autonomes pendant une période assez longue. Au cours du fonctionnement d'un système WSN, il sera nécessaire de corriger les bugs logiciels, de reconfigurer les paramètres du système, et de mettre à jour le logiciel pour fiabiliser le système [ZW14]. Pour un grand système WSN, manipuler les capteurs manuellement est presque impossible dans la mesure où certains WSNs sont déployés dans des zones difficiles d'accès aux humains. La dissémination entre les nœuds mobiles se révèle alors très prometteuse.
- *Mobile Human Networks* : avec la prolifération des appareils mobiles (e.g. smartphones, tablettes), les utilisateurs ont tendance à manipuler, engendrer et partager un grand volume de contenu tous les jours. Avec les progrès des technologies sans fil (e.g. bluetooth, WiFi-Direct), les utilisateurs peuvent partager ces contenus via des communications opportunistes [ZVID11].

Par conséquent, une technique de dissémination permettant de propager les contenus aux utilisateurs intéressés sera nécessaire tout en garantissant une utilisation efficace des ressources du réseau et des équipements mobiles.

- *Military Networks* : dans les réseaux militaires, il est nécessaire de diffuser des décisions, à partir des données recueillies et analysées dans les centres de commandement et de contrôle, aux combattants sur le terrain. Cela est possible en disséminant les décisions aux appareils mobiles des combattants [CGSR12].
- *Vehicular Networks* : Pendant ces dernières années, plusieurs projets européens et internationaux ont montré, avec des prototypes et des expérimentations, la faisabilité et l'importance des communications véhiculaires dans le cadre de plusieurs applications. Cela va inciter les constructeurs automobiles à augmenter le taux de pénétration des **OBU**s dans les véhicules avec la technologie **DSRC**. Les véhicules équipés d'**OBU**s permettent aux usagers routiers de disséminer différents types de contenus (e.g. informations de trafic, des offres de station de services).

2.1 Phases de la dissémination et classification des solutions existantes

À partir de la création des contenus jusqu'à l'évaluation des performances, nous avons recensé sept phases qu'un protocole de dissémination de contenus d'un réseau mobile **DTN** doit traverser comme représenté sur la figure 2.2.

Dans ce qui suit, nous allons détailler chacune des phases de la dissémination en présentant les solutions les plus significatives proposées dans l'état de l'art et qui sont également retranscrites sur la figure 2.2.

2.1.1 Phase 1 : Génération des contenus

Dans un réseau mobile **DTN**, les contenus peuvent être engendrés soit par les nœuds eux-mêmes, appelés sources, soit par des serveurs de contenus.

- **Nœuds-sources** : Les nœuds d'un réseau mobile **DTN** peuvent créer des contenus en utilisant les équipements mobiles. Ensuite, les nœuds sources propagent les contenus engendrés vers les

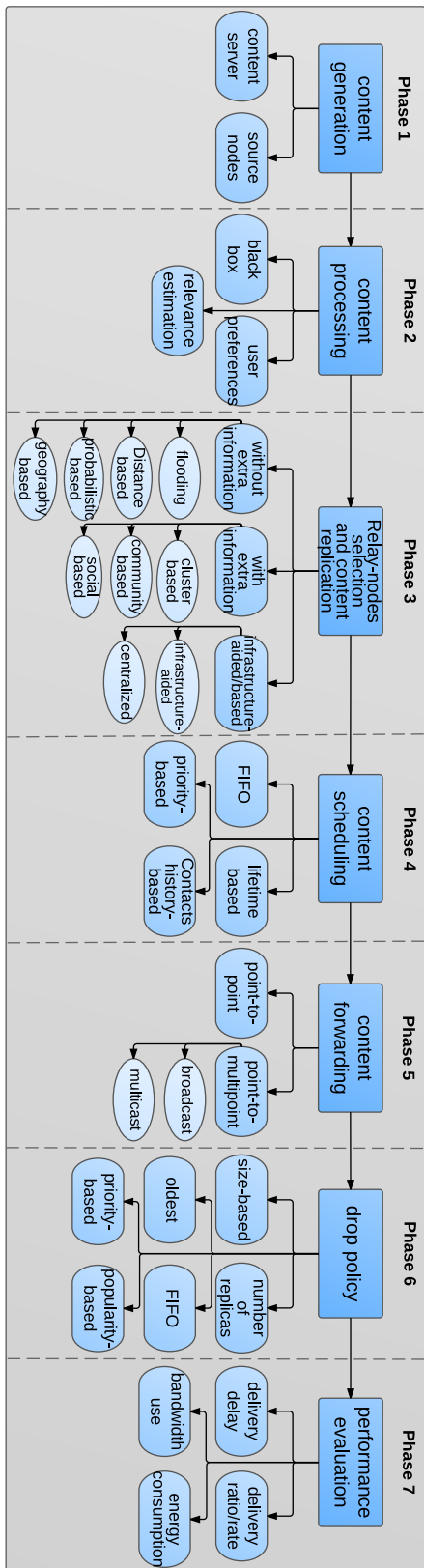


FIGURE 2.2 – Classification des solutions existantes selon les phases de la dissémination de contenus dans les réseaux mobiles DTN

autres nœuds du réseau. À titre d'exemple, dans un cas d'urgence sur la route (e.g. accident), une information de trafic peut être engendrée automatiquement par un véhicule impliqué dans la situation d'urgence ou par un usager routier à proximité du lieu de l'événement [NB06]. Nous pouvons citer un autre exemple dans le contexte des réseaux de capteurs mobiles, celui dans lequel les nœuds se déplacent, collectent des données de l'environnement qui les entoure (i.e. température, pression) et les disséminent vers les nœuds puits (sink-nodes) [HC08].

- **Serveurs de contenus** : Les contenus peuvent être déposés sur un ou plusieurs points centraux et ensuite propagés vers les nœuds mobiles. Par exemple, afin de mettre à jour les capteurs mobiles, une information sera engendrée puis envoyée depuis le centre de commande vers les nœuds du réseau [ZW14]. Des centres de services qui désirent attirer les personnes à proximité de leurs offres, envoient des offres ou des promotions aux smartphones des utilisateurs. Cette méthode consiste alors à distribuer initialement les contenus vers un ensemble de nœuds, appelés sources initiales, qui s'occuperont ensuite de propager les contenus dans le réseau via les communications sans fil à courte portée. De ce fait, il est nécessaire de concevoir un mécanisme efficace qui porte sur le choix et le nombre des sources initiales.

2.1.2 Phase 2 : Traitement des contenus

Le traitement des contenus peut être classifié en trois catégories : (i) *boîte noire*, (ii) *estimation de la pertinence* et (iii) *préférences utilisateur*.

- (i) **Boîte noire** : cette méthode consiste à ignorer le contenu de l'information envoyée. Par conséquent, tous les nœuds du réseau sont considérés comme destination des différents contenus. La pertinence de l'information pour les nœuds est ignorée et est caractérisée uniquement par des caractéristiques générales telles que la taille et la durée de vie. Cette méthode sera utile quand le contenu est nécessaire à tous les nœuds du réseau comme dans le cas de l'envoi de mise à jour logicielle pour les nœuds-capteurs mobiles. En revanche, certains contenus devraient n'être envoyés qu'à un ensemble limité de nœuds auquel cas cette première solution ne convient pas.
- (ii) **Estimation de la pertinence** : afin de déterminer l'ensemble des nœuds destinataires du

contenu, une nouvelle méthode consiste à estimer la pertinence du contenu pour les nœuds [CDI11, DCI08, SXW⁺10] en exploitant des informations sur les nœuds ainsi que sur les contenus. À titre d'exemple, dans un contexte de réseaux véhiculaires, une information sur un événement de la route est estimée de plus en plus importante quand la probabilité qu'un véhicule rencontre cet événement augmente. Par conséquent, le contenu est considéré intéressant pour un nœud si la probabilité de rencontrer l'événement est supérieure à un seuil défini. Cette solution ne sera utile qu'avec certains types de contenus tels que les informations de trafic sur une zone spécifique, où généralement seuls les nœuds qui passeront par cette zone seront concernés. Au contraire, cette méthode ne sera pas utile dans le cas où les contenus sont destinés à tous les nœuds du réseau (e.g. régler un bug de nœuds capteurs) ou bien quand la pertinence du contenu est difficile à estimer (e.g. information d'une offre de restaurant).

(iii) **Préférences utilisateur** : une troisième méthode considère que les contenus sont liés aux intérêts propres des usagers routiers [ZZC09, Leo07, GPP⁺15]. Les utilisateurs doivent alors exprimer leurs préférences dans le but de recevoir les contenus qui les intéressent. Cette méthode permet de limiter les échanges des contenus. En revanche, elle nécessite un mécanisme supplémentaire qui permet à chaque utilisateur de définir ses préférences.

2.1.3 Phase 3 : Sélection des nœuds relais et réplication des contenus

Après avoir créé les contenus, il faut concevoir un protocole de sélection des nœuds relais qui seront chargés de la propagation des contenus. Globalement, selon les solutions de sélection de relais proposées pour la dissémination dans les réseaux mobiles DTN, nous classifions ces algorithmes en deux catégories : (i) sans signalisation et (ii) avec signalisation.

Sélection de relais sans informations supplémentaires

Dans cette partie nous commençons par présenter les différents algorithmes de sélection de nœuds relais qui ne nécessitent pas d'échanges supplémentaires pour la connaissance du réseau ou des nœuds.

- **Simple flooding** : une première solution de dissémination proposée pour les réseaux mobiles DTN, appelée *simple flooding* ou inondation simple [VB00], consiste à diffuser tous les contenus

à tous les nœuds. Par conséquent, chaque nœud qui reçoit le contenu se charge à son tour de le diffuser. Cette solution conduit à des taux de délivrance importants ainsi qu'à de faibles délais, mais au prix d'une grande consommation des ressources du réseau (i.e. en termes de bande passante) et des nœuds (consommation d'énergie et stockage des contenus). Cette technique explore tous les chemins de communication disponibles pour disséminer les contenus ce qui risque de surcharger et de congestionner le réseau et de causer ainsi le problème du *Broadcast storm* [TNCS02].

En raison de la limitation des ressources des réseaux mobiles DTN, le *Simple flooding* ne serait pas applicable en pratique. Comme le *simple flooding* atteint de bons résultats en termes de taux et de délai de délivrance, il est utilisé comme modèle de référence dans la littérature.

Enhanced flooding

Dans le but de surmonter le problème de *broadcast storm* provoqué par le *simple flooding*, plusieurs approches, que nous appelons *enhanced flooding*, ont ensuite été proposées. Ces approches permettent d'améliorer le *simple flooding* en limitant le nombre de contenus répliqués dans le réseau et par conséquent de réduire le nombre de nœuds qui devront retransmettre les contenus (i.e. réduire le nombre de nœuds relais). Parmi les solutions existantes, on trouve principalement : (i) *probabilistic-based flooding*, (ii) *geographical-based flooding* et (iii) *distance-based flooding*.

- ***Probabilistic-based*** : des méthodes probabilistes ont été proposées pour améliorer le principe du *flooding* [WTP⁺07, CCC⁺12]. L'idée est que lors de la réception d'un contenu, le nœud calcule une probabilité qui peut être dépendante de plusieurs facteurs comme le nombre de messages dupliqués reçus ou la capacité en énergie. Cette probabilité est ensuite utilisée pour décider si le nœud rediffuse le contenu. Quand la probabilité est égale à 100%, la méthode sera alors équivalente au *simple flooding*. Dans la littérature, plusieurs solutions fondées sur ce principe ont été proposées avec différentes méthodes de calcul de la probabilité.
- ***Geographical-based*** : appelée aussi *geo-dissemination* ou *location-based dissemination*, elle consiste à disséminer un contenu uniquement dans une région géographique spécifique [LW12, MH09]. Comme certains contenus peuvent n'être intéressants que dans des zones spécifiques

(e.g. promotions dans un centre commercial, offres d'une station service), cette méthode consiste à disséminer ces contenus dans une région limitée. Par conséquent, un nœud ne diffuse le contenu que s'il se situe à l'intérieur de la zone définie. À titre d'exemple, une approche a été proposée pour les réseaux véhiculaires [LW12], qui porte sur la dissémination des informations de trafic uniquement pour les véhicules concernés (e.g. disséminer une information sur un accident de la route aux seuls véhicules qui vont en direction de cet événement). Cela permet alors de limiter le nombre de destinataires et par conséquent de réduire la congestion dans le réseau.

- ***Distance-based*** : des techniques de dissémination considèrent les distances entre les nœuds afin de réduire le nombre de nœuds qui vont relayer les contenus [SFL+00, CSD13]. Par exemple, en utilisant le protocole DDT (*Distance Defer Transfer*) [SFL+00], quand un nœud diffuse un contenu aux autres nœuds à proximité, parmi ces derniers, seul le nœud qui est le plus loin de la source sera chargé de diffuser le contenu. Pour ce faire, le nœud source ajoute son emplacement (déterminé grâce au système [Global Positionning System \(GPS\)](#)) au contenu à diffuser. Lors de la réception de ce contenu par les nœuds voisins, chacun calcule sa distance par rapport à la source et déclenche un temporisateur inversement proportionnel à la distance calculée. Par conséquent, le nœud qui possède le temporisateur le plus faible rediffuse le contenu quand le temporisateur expire. Quant aux autres nœuds, ils annulent leur transmission lorsqu'il reçoivent le même contenu de la part du nœud chargé de la diffusion. Cela permet de minimiser la réception des contenus dupliqués.

L'avantage des méthodes de dissémination fondées sur le *flooding* est qu'elles sont opérationnelles sans avoir recours à des informations supplémentaires sur le réseau (e.g. découverte de voisinage). Néanmoins, même si les techniques décrites ci-dessus peuvent conduire à de bons résultats, elles n'exploitent pas d'autres éléments clés des réseaux mobiles DTN tels que la mobilité des nœuds ou les relations sociales entre les nœuds qui peuvent être utilisées pour améliorer la dissémination. D'autres techniques sont donc apparues, que nous appelons sélection de relais avec exploitation d'informations supplémentaires (*with extra-information*), qui utilisent des informations sur le réseau et/ou sur les nœuds afin d'améliorer la dissémination.

Sélection de relais avec exploitation d'informations supplémentaires

Pour connaître des informations sur le réseau ou sur les nœuds, des échanges supplémentaires seront alors nécessaires. Par exemple, les protocoles de dissémination de contenus nécessitent que les nœuds diffusent périodiquement des messages de balise (ou *beacon*) permettant la découverte des informations sur le voisinage. Les messages de *beacon* contiennent généralement des informations sur les nœuds. Par exemple, dans la littérature, les messages de *beacon* échangés périodiquement entre les véhicules sont de la forme suivante : $\langle id, x, y, s, \vec{dir}, seq \rangle$ où id représente l'identité du nœud ; (x, y) sont les coordonnées du véhicule ; s et \vec{dir} représentent la vitesse et la direction du nœud ; seq est un champ qui peut contenir d'autres informations sur le véhicule.

- **Cluster-based** : le principe de cette technique est de regrouper les nœuds en groupes (i.e. *clusters*) en utilisant les positions géographiques des nœuds [LCC06, DBB13]. Dans chaque groupe un nœud sera élu pour jouer le rôle du *cluster head*, les autres sont appelés nœuds ordinaires. Les nœuds appartenant à plusieurs groupes s'appellent des *gateways* et seront responsables des échanges inter-groupes. Par conséquent, pour la dissémination, seuls les *cluster heads* et les *gateways* seront responsables d'envoyer les contenus dans le réseau, ce qui permet de réduire la duplication des contenus. Les difficultés de cette technique peuvent être définies principalement par les questions : *comment créer le groupe et quelle sera sa taille (i.e. nombre de nœuds dans un groupe) ? comment élire le cluster-head ?* Cette problématique reste toujours un défi difficile à relever en particulier dans un environnement très dynamique et variable comme celui des réseaux véhiculaires, où un *cluster* risque de n'être maintenu/créé que pour quelques secondes et dans lequel les nœuds peuvent entrer et sortir rapidement en raison de leur forte mobilité.
- **Social relations-based** : des travaux récents ont étudié des traces réelles de mobilité des nœuds mobiles DTN et ont mis en évidence les relations sociales pouvant exister entre eux [QZZ⁺14, ZDC⁺13, MGC⁺07]. Par conséquent, les relations sociales entre les nœuds pourront être exploitées pour améliorer la dissémination. Par exemple, en utilisant l'historique des contacts, les nœuds qui jouent un rôle important dans le réseau (i.e. ont un degré de centralité élevé) seront choisis pour relayer les contenus afin de les propager à un grand nombre de nœuds possible [QZZ⁺14]. Cela permet d'augmenter le taux de délivrance tout en limitant les nœuds qui

relayent les contenus.

- **Community-based** : d'autres approches ont porté sur l'utilisation des communautés pour la dissémination. Une communauté peut être fondée sur différents paramètres tels que les intérêts des utilisateurs puisqu'en réalité, les utilisateurs ont tendance à communiquer en formant des communautés et à échanger des contenus en fonction de leurs propres préférences. Quand un contenu est intéressant pour une communauté, un mécanisme de sélection de *forwarder* sera alors nécessaire pour désigner le nœud qui se charge de diffuser le contenu pour sa communauté [XLL⁺15]. Cette technique permet de minimiser les échanges des contenus inintéressants mais elle constitue un défi difficile en raison de la complexité de création des communautés surtout dans un environnement fortement dynamique.

Utilisation de l'infrastructure

Les infrastructures des réseaux mobiles DTN (e.g. RSUs, infrastructure cellulaire) peuvent être exploitées quand elle existent. Les solutions de sélection de relais et de réplication de contenus, qui utilisent l'infrastructure, peuvent être classifiées selon deux catégories : (i) solution centralisée et (ii) utilisation conjointe de l'infrastructure et des communications opportunistes entre les nœuds.

- **Solution centralisée** : certaines solutions de réplication de contenus sont centralisées et nécessitent ainsi des communications permanentes des nœuds avec l'infrastructure. Ces derniers peuvent permettre de faibles délais de délivrance ainsi que de forts taux de délivrance grâce aux communications sans fil à longue portée. En revanche, ces communications sont coûteuses et la couverture des infrastructures est limitée sur autoroute ou dans les zones rurales.
- **Utilisation conjointe de l'infrastructure et des communications opportunistes** : un réseau mobile DTN peut être partitionné en plusieurs îlots. Lorsque les fréquences de contacts entre les nœuds conduisent à des partitions du réseau, cela aura un impact sur la dissémination des contenus en utilisant le seul environnement opportuniste. Par conséquent, l'infrastructure, sera un moyen pour aider à la réplication des contenus afin d'accélérer leur propagation dans le réseau [TSVP14]. Ces approches sont fondées principalement sur les communications opportunistes entre les nœuds et l'utilisation des infrastructures est optionnelle.

Dans les réseaux mobiles DTN, les nœuds peuvent stocker et porter les contenus pendant de longues périodes de temps, jusqu'à ce qu'une occasion de communication et d'envoi apparaisse. De plus, plusieurs contenus sont souvent dupliqués afin d'augmenter la propagation des contenus dans le réseau. Cette combinaison de stockage de longue durée et de réplication impose une charge élevée en termes de stockage et de bande passante. Ainsi, des méthodes d'ordonnement et de rejet de contenus sont nécessaires pour décider : (i) l'ordre dans lequel les contenus doivent être répliqués quand les durées de contact sont limitées, et (ii) les contenus qui doivent être supprimés lorsque les *buffers* des nœuds opèrent près de leurs capacités de stockage.

2.1.4 Phase 4 : Ordonnement des contenus

Dans les réseaux mobiles DTN, l'ordonnement des contenus à disséminer est influencé principalement par les faibles durées de contact entre les nœuds. Dans l'état de l'art, peu de solutions de dissémination, dans les réseaux mobiles DTN, considèrent l'ordonnement des contenus. En effet, la majorité des protocoles de dissémination considère un seul type de contenu, par conséquent, l'ordonnement n'a pas d'impact sur la dissémination.

Les algorithmes d'ordonnement, conçus pour les réseaux mobiles DTN, peuvent être répartis en deux catégories. On peut considérer ceux qui ne nécessitent pas d'informations sur le réseau. Ils dépendent uniquement des informations locales sur les contenus, tel que le TTL, la taille du contenu et le temps d'arrivée afin de déterminer l'ordonnement des contenus à disséminer. Par ailleurs, nous avons des algorithmes qui reposent sur la connaissance d'informations sur le réseau, tels que les fréquences de contacts entre les nœuds. Parmi les algorithmes d'ordonnement, nous pouvons citer principalement :

- **FIFO** : l'ordonnement est fondé sur le temps de réception des contenus (i.e. le premier contenu arrivé sera le premier à disséminer lors d'un contact opportuniste).
- **Size-based** : étant donné que les contenus ont des tailles différentes, les contenus de faibles tailles sont prioritaires lors de la dissémination afin d'envoyer un plus grand nombre de contenus [RAZA10].
- **Lifetime-based** : étant donné que les contenus peuvent avoir différentes durées de vie, cet

algorithme consiste à trier les contenus selon leur durée de vie dans un ordre soit ascendant soit descendant [SRFN09].

- **Priority-based** : différentes priorités sont attribuées aux contenus. Les contenus sont ainsi disséminés selon leur ordre de priorité [BGJL06].
- **Contact history-based** : cette méthode nécessite que chaque nœud sauvegarde les fréquences de contacts avec les autres nœuds dans le réseau afin de déterminer l’ordonnement des contenus à disséminer lors des communications. À titre d’exemple, un nœud, qui a rencontré plusieurs fois un destinataire de contenu, est susceptible de le rencontrer de nouveau dans un futur proche. Par conséquent, un nœud peut estimer la probabilité d’atteindre la destination d’un contenu en utilisant la fréquence de contact moyenne qu’il a observée. De ce fait, quand des nœuds communiquent, ils doivent d’abord échanger leurs probabilités de rencontre des destinations afin d’ordonner les différents contenus [TCLW12].
- **Popularity-based** : puisque les contenus possèdent des popularités différentes, certains contenus sont très demandés (intéressants) par la majorité des utilisateurs. Les contenus sont alors disséminés dans l’ordre de leur popularité [BP13].

2.1.5 Phase 5 : Relayage des contenus

Les communications entre les nœuds d’un réseau mobile DTN peuvent être soit en point-à-point soit en point-à-multipoint.

- **Point-à-point** : depuis que le concept des réseaux DTN a été introduit, une grande attention a été portée aux communications point-à-point (i.e. unicast) dans le but de bâtir des protocoles de routage efficaces en termes de délai de délivrance de la source à la destination ainsi que d’utilisation des ressources du réseau et des appareils mobiles.
- **Point-à-multipoint** : plus récemment, des recherches se sont focalisées sur la dissémination de contenus dans les réseaux mobiles DTN, en se fondant sur les communications point-à-multipoint, permettant de partager et d’échanger les contenus entre les nœuds. Ces communications peuvent être en *broadcast* ou en *multicast*.

2.1.6 Phase 6 : Politique de suppression

Les méthodes de suppression de contenus sont influencées par la capacité de stockage des équipements des nœuds mobiles. Plus la capacité de stockage est faible plus grand est son impact sur la dissémination de contenus. Certaines méthodes utilisent seulement des informations locales sur les contenus stockés dans la mémoire comme les tailles ou les durées de vie des contenus. D'autres méthodes nécessitent des informations globales sur le réseau comme le nombre de duplications des contenus.

- ***Size-based*** : pour la suppression des contenus, cette méthode est fondée sur la taille des contenus stockés dans la mémoire du nœud. Par exemple, afin de libérer rapidement la mémoire d'un nœud, on supprimera en premier le contenu le plus volumineux [TCLW12].
- ***Oldest*** : cet algorithme supprime les contenus selon leur durée de vie résiduelle. À titre d'exemple, quand la mémoire d'un nœud est pleine, les contenus avec une faible durée de vie sont supprimés en premier puisqu'ils seront obsolètes lors de l'expiration de leurs TTLs [SRFN09].
- ***Number of replica-based*** : pour décider sur la suppression d'un contenu, cette méthode nécessite la connaissance d'une information globale sur l'état d'un contenu qui est le nombre de duplications. Pour chaque contenu dans la mémoire, une valeur d'utilité est calculée en fonction du nombre de répliques. Ensuite, les contenus les moins utiles seront supprimés en premier [KBS12, TCLW12].
- ***FIFO*** : la suppression des contenus est faite selon leur ordre de réception. Par conséquent, quand la mémoire est pleine, le premier contenu reçu sera le premier à supprimer.
- ***Priority-based*** : différentes priorités sont attribuées aux différents contenus. Les contenus de faible priorité sont supprimés en premier [BGJL06].
- ***Popularity-based*** : l'idée est alors de garder les contenus les plus populaires; les nœuds suppriment en premier les contenus peu populaires [BP13].

2.1.7 Phase 7 : Métriques de performance

Pour évaluer les performances des techniques de dissémination, les principales métriques utilisées sont : (i) le délai de délivrance, (ii) le taux de délivrance, (iii) l'utilisation de la bande passante, (iv)

la consommation de l'énergie et (v) la qualité de service.

- **Délai de délivrance** : il s'agit du délai pour que le contenu soit reçu par les nœuds. Certains contenus ont des durées de vie limitées et doivent être disséminés aux nœuds le plus rapidement possible. Pour cela, des protocoles de dissémination ont été proposés ayant pour objectif d'accélérer la dissémination des contenus [ZDC⁺13].
- **Taux de délivrance** : il s'agit du taux de délivrance des contenus par les destinations. Plusieurs techniques de dissémination ont pour objectif de maximiser la couverture de délivrance des contenus [QZZ⁺14]. Autrement dit, les contenus sont diffusés au plus grand nombre de nœuds possible.
- **Utilisation de la bande passante** : cette métrique fait référence à l'utilisation des ressources du réseau. L'utilisation de la bande passante représente une contrainte majeure. En effet, les algorithmes de dissémination doivent utiliser efficacement le support afin de ne pas surcharger le système [FYC11]. En particulier, dans un réseau dense, un échange excessif de données et/ou de signalisation peut surcharger le réseau.
- **Consommation des ressources énergétiques** : cette métrique détermine le niveau de consommation des ressources en énergie. Elle est très importante pour les réseaux mobiles DTN caractérisés par des équipements mobiles ayant de faibles ressources en énergie (e.g. les nœuds-capteurs). Il est alors nécessaire de mettre en œuvre un mécanisme qui permette de minimiser la consommation de l'énergie et qui garantisse une consommation équilibrée entre les différents nœuds capteurs. En effet, si un nœud est souvent élu pour relayer des contenus vers les autres nœuds, cela se traduit par une consommation d'énergie importante et une réduction de sa durée de vie.
- **Qualité de service (QoS)** certaines applications qui DTN ont leurs exigences en termes de qualité de service qui doivent être garanties par le protocole de dissémination. À titre d'exemple, si l'on considère les applications de *streaming* audio/vidéo, les pertes de paquets et la gigue ne doivent pas dépasser certains seuils pour ne pas dégrader la qualité d'expérience des utilisateurs finaux [DBB13].

Le tableau 2.2 illustre différentes approches de dissémination conçues pour les réseaux mobiles DTN.

Généralement, chaque réseau mobile DTN possède des caractéristiques et des applications bien spécifiques. La question qui se pose est alors : *Peut-on bâtir un protocole de dissémination efficace qui puisse être utilisé par tous les réseaux mobiles DTN ?* Pour répondre à cette question, nous comparons deux réseaux mobiles DTN : les *Vehicular Social Networks (VSNs)* qui sont des réseaux formés par des passagers ou conducteurs et utilisent des équipements embarqués dans les véhicules (i.e. OBU) et les *Mobile Social Networks (MSNs)* qui sont définis comme des réseaux sociaux formés par des personnes utilisant leurs appareils mobiles (e.g. smartphones).

3 Les protocoles de dissémination conçus pour MSN conviennent-ils pour les VSN ?

Nous comparons les réseaux MSN et VSN sous deux angles : (i) relations sociales et (ii) communications entre les nœuds.

- (i) Du point de vue des relations sociales, les relations entre les utilisateurs du MSNs sont plus fortes que celles que l'on peut avoir dans les VSNs. En effet, d'une part, les utilisateurs du MSN ont une probabilité plus forte de se rencontrer chaque jour et de communiquer. À titre d'exemple, on peut citer le cas de collègues à l'université ou d'employés au travail. D'autre part, dans les VSN, les usagers routiers n'ont pas une grande probabilité de se rencontrer, même s'ils ont la même destination, en raison de la taille et de la dynamique du réseau. En outre, dans les MSNs, les nœuds qui ont des intérêts communs ont tendance à se rencontrer souvent. La raison en est que les humains forment généralement des groupes reposant sur des préférences similaires, puisque les gens partageant des intérêts communs sont plus susceptibles de se lier et de se trouver dans de même lieux géographiques (musée, cinéma, stade de football). Au contraire, dans les réseaux véhiculaires, il est possible que des nœuds partagent des intérêts et destinations communs mais ne se rencontrent pas nécessairement.

TABLE 2.2 – Solutions de dissémination proposées pour les réseaux mobiles DTN

solution de dissémination proposée	type des nœuds mobiles	génération de contenus	traitement des contenus	sélection des nœuds relais	ordonnancement	mode de transmission	politique de suppression	métriques de performance
Epidemic [YB00]	nœuds mobiles DTN	–	boîte noire	flooding	–	<i>broadcast</i>	–	délat, taux de délivrance
Spray and Wait [SPR05]	nœuds mobiles DTN	nœuds sources	boîte noire	flooding avec limitation de contenus dupliqués	–	<i>broadcast</i>	–	délat
Prophet [LDS04]	nœuds mobiles DTN	nœuds sources	boîte noire	<i>flooding</i> probabiliste (fondée sur historiques de contacts)	–	<i>broadcast</i>	FIPO	délat, taux de délivrance, overhead
MaxProp [BGL06]	bus	nœuds sources	boîte noire	flooding avec limitation de contenus dupliqués	priority-based	broadcast	priority-based	délat, delivery rate
RAPID [BLV07]	bus	nœuds sources	boîte noire	–	–	broadcast	number of replicas	délat
Bubble rap [HCY11]	traces de contact entre humains	nœuds sources	boîte noire	social-based	–	broadcast	–	taux de délivrance
POST [QZZ+14]	véhicules	serveur de contenus	boîte noire	social-based	–	<i>broadcast</i>	–	taux de délivrance
DBA [DBB13]	véhicules	source-nodes	boîte noire	cluster-based	–	<i>broadcast</i>	–	délat, taux de délivrance
MobiClique [POL+09]	traces de contact entre humains	–	préférences utilisateurs	community-based	–	broadcast	–	validation fonctionnelle par prototype
ZOOM [ZDC+13]	bus	nœuds sources	boîte noire	social-based	–	<i>broadcast</i>	–	taux de délivrance, délat
SimBet [DH07]	traces de contact entre humains	nœuds sources	boîte noire	social-based	–	<i>broadcast</i>	–	délat, taux de délivrance, overhead
VESPA [DLC13, CDH11]	véhicules	nœuds sources	estimation de la pertinence	–	–	<i>broadcast</i>	–	validation fonctionnelle par prototype
ROD [CSD10, CSD13]	véhicules	nœuds sources	boîte noire	distance-based	–	<i>broadcast</i>	–	délat, taux de délivrance
Social dissémination [PAM+10]	traces de capteurs mobiles	serveur de contenus	boîte noire	community-based	–	<i>broadcast</i>	–	délat, overhead
Persistent protocol [LCM09]	véhicules	serveur de contenus	préférences utilisateur	infrastructure-aided & geography-based	–	<i>broadcast</i>	–	taux de délivrance, overhead
Heuristique [LZW14]	véhicules	serveur de contenus	préférences utilisateur	infrastructure-aided	–	–	–	taux de délivrance

(ii) Du point de vue des communications, les nœuds d'un réseau VSN se déplacent dans un environnement très vaste sans s'arrêter alors que les nœuds du MSN sont généralement dans des espaces réduits comme un campus ou un centre commercial. Par conséquent, les fréquences de contacts entre les mêmes utilisateurs sont très différentes. En outre, les VSNs se distinguent également des MSNs par un modèle de mobilité dont une des propriétés les plus évidentes est l'importante vitesse des nœuds qui réduit considérablement les durées des communications. Ces conditions sont de nature à poser des problèmes de connectivité plus importants pour les VSN que pour les MSNs. Donc, lorsque deux personnes se rencontrent dans un MSN, si l'on considère l'avancée des technologies sans fil dans les appareils mobiles (e.g. WiFi direct), ils auront suffisamment de temps pour échanger un volume de contenu important. En revanche, lorsque deux véhicules entrent en communication, ces derniers ne possèdent que quelques secondes pour échanger un volume de contenu forcément limité [MDNB14].

Pour conclure, les protocoles de dissémination conçus pour les réseaux MSNs peuvent être appliqués mais ne seront pas efficaces pour les VSNs. Les recherches et les réalisations effectuées sur la dissémination dans le domaine des réseaux mobiles DTN ne peuvent être directement appliquées dans le cadre de réseaux de véhicules, car ces derniers présentent des caractéristiques et des spécificités trop contraignantes.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons en particulier aux réseaux véhiculaires.

User satisfaction : une nouvelle métrique pour évaluer les performances ?

L'observation de la classification proposée conduit à des éléments différents qui peuvent améliorer les approches de dissémination de contenus. Les applications DTN reposent sur l'échange des contenus qui sont soit nécessaires pour tous les nœuds du réseau tels qu'une mise à jour système pour des capteurs mobiles, soit intéressantes pour un ensemble limité de nœuds comme une information publicitaire sur une promotion d'un centre commercial. Pour les applications DTN qui sont dépendantes des intérêts des nœuds, même si les approches de dissémination existantes permettent de diffuser les contenus à un grand nombre d'utilisateurs dans de courtes durées et avec une utilisation efficace de la bande passante, elles pourraient ne pas satisfaire les intérêts des utilisateurs. La

plupart des approches de dissémination, conçues pour les réseaux mobiles DTN, considèrent un seul type de contenus ou bien des contenus qui diffèrent par leur taille ou leur durée de vie. Néanmoins, cela n'est pas réaliste dans certaines applications DTN où différents types de contenus appartenant à différentes thématiques peuvent être engendrés.

Dans les réseaux véhiculaires, contrairement aux applications de sécurité, les applications d'informations et de divertissement vont voir apparaître plusieurs contenus chaque jour et un utilisateur ne sera pas forcément intéressé par tous ces contenus. En effet, un utilisateur désire accéder à des contenus spécifiques et aura des intérêts hétérogènes pour les différents contenus qui peuvent circuler dans le réseau.

De plus, les réseaux mobiles DTN sont caractérisés par des communications courtes et intermittentes entre les nœuds en raison de leur mobilité ce qui peut limiter le volume échangé et aboutir à des longs délais de délivrance. Ces caractéristiques sont d'autant plus contraignantes quand la mobilité des nœuds augmente ainsi que la topologie et la dynamique du réseau. Ces caractéristiques sont importantes et doivent être considérées pour améliorer la dissémination.

Notre point est donc qu'au-delà des taux de délivrance des contenus, il faudra aussi vérifier que les utilisateurs ont surtout reçu les informations qui les intéressent. Pour répondre à ce besoin, nous proposons une nouvelle métrique, nommée « *user satisfaction* ». Cette métrique peut être définie par rapport à différents paramètres tels que les intérêts des utilisateurs. Nous reviendrons pour la suite sur les formes prises pour ces intérêts et sur la façon avec laquelle les utilisateurs peuvent les exprimer.

En conclusion, dans les applications d'informations et de divertissement qui fournissent des services et un meilleur confort à l'utilisateur, la contrainte majeure est de répondre aux intérêts des usagers routiers.

4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté différents environnements de réseaux mobiles DTN en montrant leurs caractéristiques qui sont généralement spécifiques à chacun d'entre eux. Ensuite, nous

avons dressé une classification selon les phases de la dissémination de contenus dans les réseaux mobiles DTN en présentant certaines solutions représentatives proposées dans l'état de l'art. À partir d'une comparaison entre les réseaux MSN et VSN, nous mettons en évidence la difficulté d'établir un protocole de dissémination efficace pour tous les environnements DTN.

Généralement, les approches de dissémination conçues pour les réseaux mobiles DTN, ne considèrent qu'un seul type de contenus ce qui n'est pas réaliste si l'on considère une variété (de types) d'applications DTN. En effet, elles vont engendrer plusieurs contenus chaque jour qui ne peuvent être disséminés vers tous les nœuds en raison de communications courtes et intermittentes. De notre point de vue, il est alors important de déterminer le niveau de satisfaction des nœuds par rapport aux contenus reçus. Cela nous a amené à proposer une nouvelle métrique pour évaluer les performances du protocole de dissémination. Cette métrique peut être calculée en considérant différents paramètres tels que les intérêts des utilisateurs.

Dans ce qui suit, nous définissons cette métrique et nous proposons un nouveau protocole de dissémination dont nous évaluons les performances au regard de cette nouvelle métrique.

CHAPITRE 3

Disséminer pour répondre aux intérêts des usagers routiers

Sommaire

1	Contraintes de la dissémination de contenus	41
2	Exemple de motivation	43
3	I-PICK : Dissémination fondée sur les durées de contacts et les intérêts des usagers	44
3.1	Système considéré	44
3.2	Formulation du problème	48
3.3	Description détaillée de I-PICK	49
3.3.1	Phase 1 : découverte de voisins et de leurs intérêts	49
3.3.2	Phase 2 : Ordonnancement des objets	50
3.3.3	Phase 3 : dissémination des objets	52
4	Évaluation des performances par simulations	52
5	Conclusion	60

1 Contraintes de la dissémination de contenus

En raison des caractéristiques du réseau véhiculaire, des contraintes des applications, et du besoin des usagers routiers, la dissémination est l'un des problèmes les plus fondamentaux pour ce type de réseau. Notre objectif est de concevoir une technique de dissémination, dédiée aux « applications d'information et de divertissement », qui soit efficace en termes d'utilisation de ressources, mais qui réponde aussi aux attentes des usagers routiers. À partir des deux observations tirées des réseaux véhiculaires, nous jugeons nécessaire la considération de deux paramètres pour réaliser une dissémination de contenu efficace : *(i)* les intérêts des usagers routiers et *(ii)* les durées de contacts entre les véhicules.

Durées des contacts limitées

Plusieurs études approfondies ont analysé des traces réelles de mobilité véhiculaire dans l’objectif de comprendre la connectivité entre les véhicules [RP09, DPPW11, GTN⁺14, LQJ⁺15]. Une observation essentielle qui en résulte est que les durées de contacts entre les véhicules sont relativement courtes (c’est de l’ordre de quelques secondes si l’on considère une portée de transmission inférieure ou égale à 200 m). Par conséquent, quand des véhicules entrent en contact, les liens de communications seront maintenus pour de faibles durées permettant d’échanger un volume limité de contenu. La dissémination se doit d’en tenir compte notamment pour les applications de confort pour lesquelles au contraire des applications de sécurité, un grand volume de contenus peut être engendré chaque jour.

À quoi s’intéressent les usagers routiers ?

Dans les applications de divertissement plusieurs thématiques peuvent être identifiées et un utilisateur ne sera intéressé que par un sous-ensemble de ces thèmes. Par conséquent l’utilisateur aura tendance à ignorer un contenu reçu lorsqu’il ne l’intéresse pas vraiment. Il ne sera donc pas judicieux qu’une technique de dissémination vise à envoyer tous les contenus présents dans le réseau à tous les utilisateurs, ce qui est alors de toute façon irréaliste.

En conclusion, les échanges inutiles (i.e. qui n’apportent aucune utilité aux usagers routiers) résultent en une mauvaise utilisation/gaspillage des durées de communications. Autrement dit, une transmission effectuée avec succès peut ne pas être suffisante puisqu’un utilisateur lors de la réception d’un nouveau contenu, risque dans le meilleur des cas de l’examiner mais aussi de l’ignorer, ou bien encore de le supprimer. Nous considérons donc qu’une transmission s’est déroulée avec succès lorsque le contenu est reçu par l’utilisateur et apporte un intérêt à ce dernier.

Dans ce document, nous utilisons les termes “véhicules”, “utilisateurs”, “usagers routiers”, et “nœuds” de manière interchangeable. Les expressions “satisfaire les intérêts des utilisateurs” et “utilité produite” désigneront la valeur de “*Content Utility Rate*”.

Une métrique classique est le taux de délivrance des contenus qui est le rapport entre le nombre de contenus reçus et le nombre de contenus disponibles (équation 3.1). Notre idée est alors de pondérer

ces nombres par l'intérêt que les utilisateurs leur portent (équation 3.2).

$$\text{Taux de délivrance} = \frac{\text{nombre d'objets reçus}}{\text{nombre d'objets disponibles}} \quad (3.1)$$

$$\text{Content Utility rate} = \frac{\text{somme des intérêts des utilisateurs vis-à-vis des objets reçus}}{\text{somme des intérêts vis-à-vis des objets disponibles}} \quad (3.2)$$

2 Exemple de motivation

La figure 3.1 illustre un scénario simple. Dans la figure, un ensemble de trois véhicules est considéré parmi lesquels un véhicule F joue le rôle de « *forwarder* » et les deux autres véhicules V_1 et V_2 représentent les « *receivers* ». Les véhicules V_1 et V_2 possèdent différents intérêts pour les objets portés par F comme montré dans le tableau 3.1. Supposons que les différents objets sont de même taille et que Δt représente la durée nécessaire pour disséminer/recevoir un objet. À un instant t , considérons que F est en communication avec V_1 et V_2 pour des durées de communications égales à $1\Delta t$ et $2\Delta t$, respectivement (i.e. V_1 et V_2 peuvent respectivement recevoir, de la part de F , 1 et 2 objets). Différentes possibilités d'ordonnancement des objets se présente lors de la dissémination du véhicule F vers ses voisins.

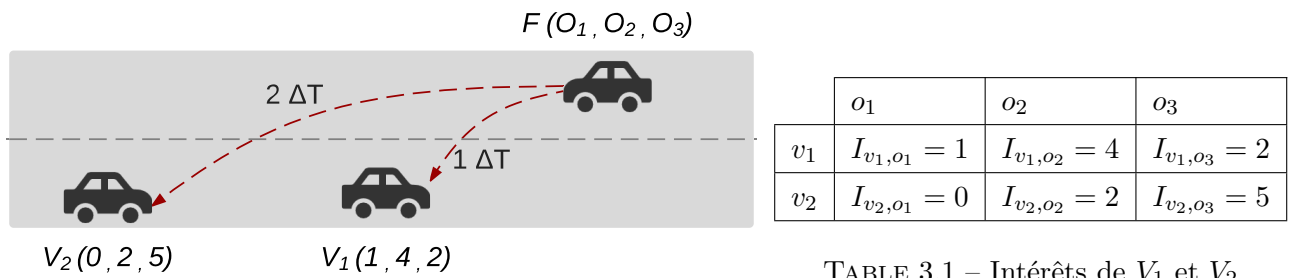


TABLE 3.1 – Intérêts de V_1 et V_2

FIGURE 3.1 – Scénario de motivation

- Méthode aléatoire : F envoie ses objets dans un ordre aléatoire, par exemple, $[o_1, o_2, o_3]$. Ainsi F peut produire l'utilité suivante :

$$\text{Utilité}_1 = (I_{v_1, o_1} + I_{v_2, o_1}) + I_{v_2, o_2} = (1 + 0) + 2 = 3$$

- Méthode considérant uniquement les intérêts des utilisateurs : afin de produire plus d'utilité, F envoie les objets dans l'ordre de leur importance pour ses voisins : $[o_3, o_2, o_1]$. Ainsi, F peut produire l'utilité :

$$\text{Utilité}_2 = (I_{v_1, o_3} + I_{v_2, o_3}) + I_{v_2, o_2} = (2 + 5) + 2 = 9$$

- Méthode considérant à la fois les intérêts des utilisateurs et les durées de contact : nous remarquons que l'ordre de réception des deux premiers objets o_2, o_3 n'a pas d'importance pour v_2 (i.e. c'est équivalent pour v_2 de recevoir o_2 ensuite o_3 ou l'inverse). Au contraire, cet ordre est important pour v_1 qui ne peut recevoir qu'un seul objet de F . Selon les intérêts de v_1 , l'objet o_2 apporte plus d'utilité à v_1 que o_3 . Par conséquent, pour maximiser l'utilité de ses voisins, F envoie ses objets dans l'ordre suivant $[o_2, o_3, o_1]$ pour réaliser l'utilité :

$$\text{Utilité}_3 = (I_{v_1, o_2} + I_{v_2, o_2}) + I_{v_2, o_3} = (4 + 2) + 5 = 11 > 9$$

3 I-PICK : Dissémination fondée sur les durées de contacts et les intérêts des usagers

3.1 Système considéré

Afin de concevoir une technique de dissémination efficace, un nouveau système qui considère à la fois les « intérêts des utilisateurs » et « les durées de contacts », sera nécessaire. La Figure 3.2 illustre une représentation en couches du système considéré qui se compose essentiellement des deux couches suivantes (i) « *interest and content layer* » et (ii) « *data propagation layer* ». La première fournit des informations sur les intérêts des utilisateurs et concentre des services des couches transport et application. La seconde gère l'échange des messages de *beacon* entre les nœuds agrégeant également des services des couches physique, liaison et routage de la pile protocolaire.

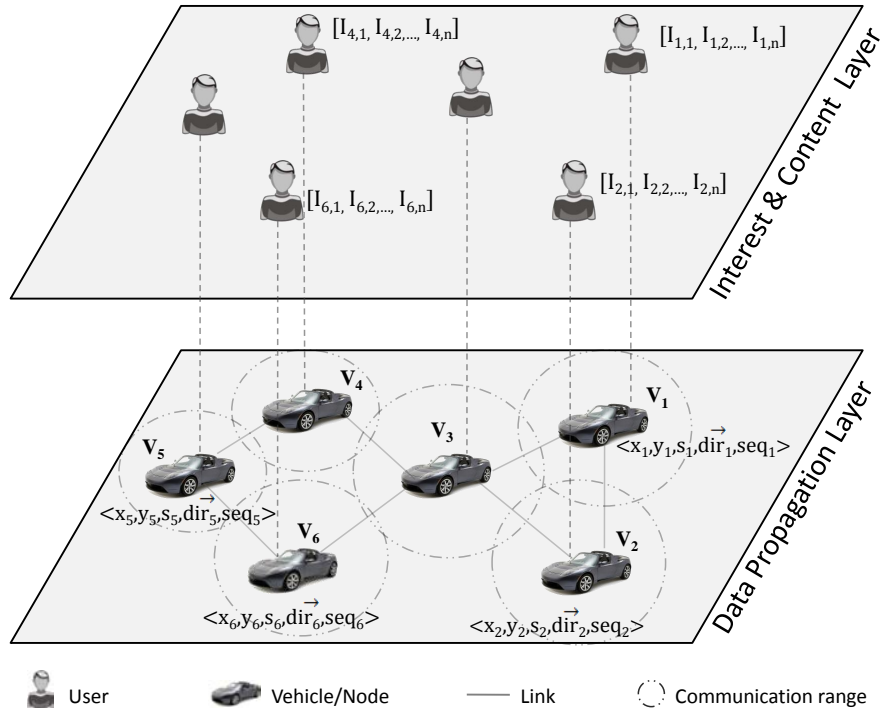


FIGURE 3.2 – Présentation en couches du système considéré

Interest and content layer

Sur la couche « *interest and content layer* », nous considérons que chaque utilisateur exprime explicitement ses propres intérêts vis-à-vis de différents thèmes prédéfinis (e.g. offres des stations-service, bon plan restaurant, annonce d'un événement touristique local). Pour simplifier et sans perte de généralité, nous considérons qu'un véhicule est associé à un seul utilisateur. Soit $\mathcal{T} = \{T_k\}$ l'ensemble des thèmes prédéfinis et I_{i,T_k} l'intérêt d'un utilisateur v_i pour le thème T_k . Les intérêts des utilisateurs pour l'ensemble des différentes thématiques seront présentés comme suit :

$$\text{Intérêts des utilisateurs} = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & \cdots & T_m \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} I_{1,T_1} & I_{1,T_2} & \cdots & I_{1,T_m} \\ I_{2,T_1} & I_{2,T_2} & \cdots & I_{2,T_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{n,T_1} & I_{n,T_2} & \cdots & I_{n,T_m} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

À un instant t , chaque nœud possède un ensemble d'objets $\mathcal{O}_{v_i}^t = \{o_j \mid o_j \in \text{mémoire de } v_i \text{ à l'instant } t\}$. Chaque objet o_j concerne un thème spécifique T_k , par conséquent, l'intérêt de v_i pour l'objet o_j , noté $I_{i,j}$, est égal à l'intérêt de v_i pour T_k (i.e. $I_{i,j} = I_{i,T_k}$ si o_j est un objet concernant le thème T_k). Nous avons donc choisi de ne pas alourdir les notations, en ne faisant pas référence à la thématique d'un objet dans le terme $I_{i,j}$. Soit $\mathcal{O} = \{o_j\}$ l'ensemble des objets présents dans le réseau. Pour simplifier, nous supposons dans ce travail que les objets ont la même taille. Nous notons donc Δt la durée nécessaire pour disséminer un objet d'un nœud à ses voisins.

Nous supposons également qu'un objet ne fait référence qu'à une seule thématique qui seront donc relativement larges. Deux solutions apparaissent alors dans lesquelles les utilisateurs expriment leur intérêt pour les objets ou pour les thématiques. La première impose que les nœuds qui ont des objets en fassent part à leurs voisins qui indiqueront en retour leur intérêt. Dans la seconde, les utilisateurs expriment simplement périodiquement leurs intérêts pour les thématiques sans préjuger des objets possédés par leur entourage. C'est cette seconde solution que nous retenons car elle est beaucoup plus légère en termes de protocole et qu'elle passe plus facilement à l'échelle.

Data propagation layer

Au niveau de la couche « *data propagation layer* », le système comporte un ensemble de véhicules $\mathcal{V} = \{v_i\}$ qui se déplacent sur les routes. Chaque véhicule est équipé d'un dispositif de communication sans fil à courte portée (i.e. OBU) utilisé pour échanger des messages de *beacon* afin de détecter les nœuds à proximité, et aussi pour communiquer et échanger des contenus avec eux. Dans ce mémoire, nous supposons que l'échange de contenus entre les nœuds se fait en *broadcast*. Quand des véhicules se rencontrent de façon opportuniste, un véhicule *forwarder* F_p sera responsable de la diffusion de ses données à ses voisins. Soit $\mathcal{F} = \{F_p\}$ l'ensemble des véhicules *forwarder* à l'instant t . Ce système suppose une synchronisation locale entre les nœuds voisins (i.e. nœuds dans la portée de communication d'autres nœuds) qui peut être effectuée grâce aux interfaces [GPS](#) présentes dans les véhicules. La synchronisation globale ne sera pas nécessaire. Soit $\mathcal{V}_{F_p}^t = \{v_i \mid v_i \text{ est voisin de } F_p\}$ la liste des nœuds voisins de F_p à l'instant t , étant $\mathcal{V}_{F_p}^t \subseteq \mathcal{V}$.

En raison de la différence des vitesses, des positions et des directions des véhicules, les voisins de

F_p seront en contact avec ce dernier pour des durées de communications différentes. F_p peut estimer la durée des contacts avec ses nœuds voisins en utilisant leurs positions, directions et vitesses [NG07, RS12]. Cette estimation est établie sur une courte échelle de temps qui correspond à la période $Time_B$ des échanges des messages de *beacon*. Durant cette période, un *forwarder* peut diffuser au maximum N objets à ses voisins. Dans ce qui suit, nous supposons que chaque *forwarder* peut estimer les durées de contact avec ses voisins. Soit $D_{i,p}$ la durée de contact entre le véhicule $v_i \in \mathcal{V}_{F_p}^t$ et F_p , exprimée en fonction de Δt (e.g. $D_{i,p} = k.\Delta t$ signifie que le lien entre le nœud v_i et F_p est maintenu pour une durée permettant d'échanger au maximum k objets). Par conséquent, F_p peut regrouper ses voisins selon leurs durées de contacts. Soit $\mathcal{V}_{F_p,k}^t = \{ v_i \mid v_i \in \mathcal{V}_{F_p}^t \text{ et } D_{i,p} \leq k.\Delta t \}$ l'ensemble des véhicules qui sont en contact avec F_p et qui ont des durées de contacts permettant de recevoir au maximum k objets de F_p avec :

$$\forall k \in [0, N], \mathcal{V}_{F_p,k}^t \subset \mathcal{V}_{F_p}^t \quad (3.3)$$

Les notations définies auparavant, sont récapitulées dans le Tableau 3.2.

Notation	Définition
\mathcal{V}	l'ensemble de tous les véhicules
\mathcal{T}	l'ensemble des thèmes prédéfinis
\mathcal{O}	l'ensemble des objets dans le réseau
$Time_B$	la période des échanges des messages de <i>beacon</i>
$\mathcal{O}_{v_i}^t$	l'ensemble des objets possédés par v_i à l'instant t
$\mathcal{O}_{F_p}^t$	l'ensemble des objets possédés par F_p à l'instant t
Δt	durée de temps nécessaire pour l'envoi ou la réception d'un objet
I_{i,T_k}	Intérêt de v_i pour le thème T_k
$I_{i,j}$	Intérêt de v_i pour l'objet o_j
$\mathcal{V}_{F_p}^t$	l'ensemble des véhicules connectés à F_p à l'instant t
$D_{i,p}$	durée de contact entre le véhicule v_i et le <i>forwarder</i> F_p
$\mathcal{V}_{F_p,k}^t$	l'ensemble des véhicules connectés à F_p durant la période $[t, t+k.\Delta t]$ et $\notin \mathcal{V}_{F_p,k+1}^t$

TABLE 3.2 – Notations utilisées

3.2 Formulation du problème

Quand un nœud *forwarder* F_p entre en communication avec son voisinage $\mathcal{V}_{F_p}^t$ à l'instant t pendant la période de temps $[t, t + Time_B]$, il peut alors diffuser à ses voisins un ensemble limité d'objets appartenant à $\mathcal{O}_{F_p}^t$. Chaque utilisateur $v_i \in \mathcal{V}_{F_p}^t$ aura un gain d'utilité égal à $I_{i,j}$ en recevant un objet o_j de F_p . Par conséquent, si l'on considère qu'à l'instant t , le *forwarder* F_p diffuse l'objet o_j à ses voisins, il permet de produire alors une utilité locale égale à :

$$Utilité^t(F_p, o_j) = \frac{\sum_{v_i \in \mathcal{V}_{F_p}^t, o_j \notin \mathcal{O}_{v_i}^t, v_i \text{ a reçu } o_j} I_{i,j}}{\sum_{v_i, o_j} I_{i,j}}$$

Cela caractérise alors le taux de satisfaction des utilisateurs vis-à-vis de la dissémination de l'objet o_j compte tenu de l'intérêt qu'ils portent à ce type de contenus. La métrique est normalisée par l'intérêt global de tous les véhicules pour l'ensemble des objets.

On considère un environnement qui contient un ensemble d'objets \mathcal{O} ayant des durées de vie limitées. Les nœuds échangent les contenus lorsqu'une communication opportuniste apparaît. La question qui se pose est : Jusqu'à l'expiration des objets, quels objets les *forwarders* doivent-ils diffuser et dans quel ordre afin de satisfaire une utilité maximale pour les utilisateurs par rapport aux objets reçus? Soit $U^t(F_p)$ l'utilité locale que peut produire F_p à l'instant t . L'objectif est donc d'effectuer un choix et un ordonnancement efficace par chaque *forwarder* afin de maximiser l'utilité globale (équation 3.4).

$$Utilité\ globale = \sum_{\substack{F_p \\ t \leq T_{max}}} U^t(F_p); \text{ où } T_{max} \text{ représente l'expiration des objets} \quad (3.4)$$

Cette problématique est difficile à résoudre pour plusieurs raisons. Tout d'abord, une connaissance de l'état futur du réseau est extrêmement délicate. Lorsqu'un *forwarder* diffuse des objets, ces derniers doivent être utiles non seulement pour ses voisins, mais aussi pour leurs futurs contacts. Or, les objets étant créés dynamiquement, les véhicules ayant des déplacements difficiles à estimer sur le long terme et une connaissance globale du réseau étant impossible, il est illusoire de chercher un optimum global. Par conséquent, nous avons choisi de diviser l'échelle de temps en laps de temps. Un laps de temps correspond à une courte période de temps pendant laquelle un *forwarder* peut avoir une vision locale

complète de ses voisins.

Dans la suite, nous détaillons notre solution de dissémination de contenus qui a pour objectif de maximiser la valeur d'utilité localement dans le temps et dans l'espace.

3.3 Description détaillée de I-PICK

Dans cette section nous présentons *contact Interest-based Content dissemination in vehicular network* (I-PICK), un nouveau protocole de dissémination qui considère les intérêts des nœuds ainsi que leurs durées de contacts et qui a pour objectif de maximiser la satisfaction des intérêts des utilisateurs. I-PICK se compose de trois phases principales, montrées dans la figure 3.3 qui sont : (i) échange de *beacon* ; (ii) ordonnancement des objets ; et (iii) la dissémination des objets. Dans ce qui suit, nous détaillerons chacune de ces phases.

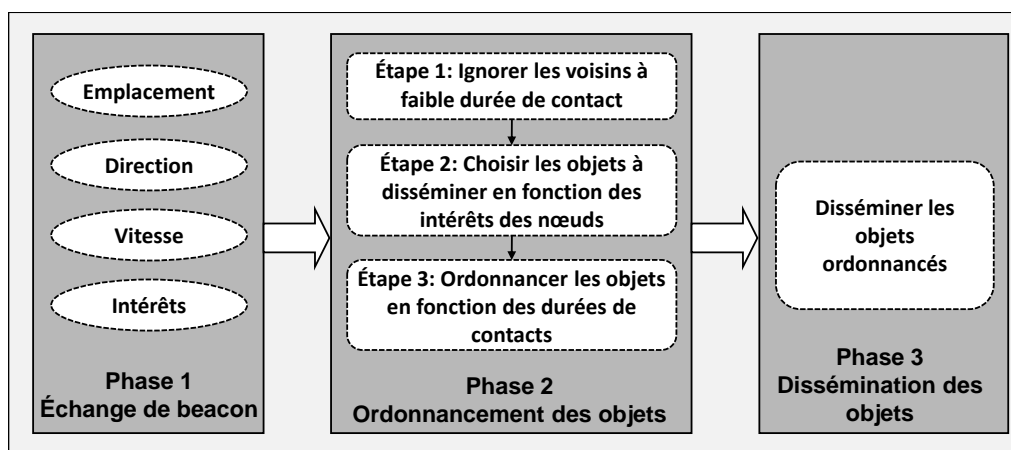


FIGURE 3.3 – Les phases de I-PICK

3.3.1 Phase 1 : découverte de voisins et de leurs intérêts

Les nœuds échangent périodiquement des messages de *beacon* permettant la découverte des nœuds voisins ainsi que leurs intérêts. Le message de *beacon* que nous utilisons est conforme à celui utilisé dans le travail [DBB13] et il a la forme suivante :

$$\langle x, y, s, \vec{dir}, seq \rangle$$

où le couple (x, y) représente les coordonnées géographiques (i.e. emplacement actuel) du véhicule ; ‘ s ’ et \vec{dir} représentent la vitesse et la direction du véhicule, respectivement ; et ‘ seq ’ est une séquence qui contient les intérêts de l’utilisateur. Les messages de *beacon* sont envoyés périodiquement à chaque période de temps $Time_B$.

3.3.2 Phase 2 : Ordonnement des objets

Soit $\mathcal{L}_{F_p}^t$ la liste des objets ordonnés que F_p dissémine à ses voisins durant $[t, t + Time_B]$. $\mathcal{L}_{F_p}^t = [o_1^f, o_2^f, \dots, o_N^f]$ où o_j^f sera le $j^{\text{ème}}$ objet disséminé par F_p . Différentes combinaisons possibles pour ordonner les objets à disséminer et aboutir ainsi à la liste $\mathcal{L}_{F_p}^t$. Notre objectif est que F_p choisisse $\mathcal{L}_{F_p}^t$ de manière à produire une utilité maximale pour ses voisins (Eq 3.5).

$$\arg \max_{\mathcal{L}_{F_p}^t} \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i \in \mathcal{V}_{F_p, j}^t} \text{Intérêt}(v_i, o_j^f)}{\sum_{v_i, o_j} I_{i, j}} \quad (3.5)$$

avec $\text{Intérêt}(v_i, o_j^f)$ est l’intérêt de v_i pour l’objet o_j^f

La complexité de ce problème est en $\mathcal{O}\left(A_{|\mathcal{O}_{F_p}^t|, N, |\mathcal{V}_{F_p}^t|}^N\right)$. Ordonner les objets par utilité décroissante ne conduisant pas à l’optimum et la complexité étant forte, nous proposons une heuristique que nous comparerons à la méthode gloutonne. L’ordonnement des objets se compose de trois étapes (voir Phase 2 dans la Figure 3.3). La première étape consiste à ignorer les voisins qui ne seront pas capables de recevoir des objets de la part de F_p (durée de contact inférieure à la durée nécessaire pour recevoir un objet). La deuxième étape porte sur le choix des objets que F_p diffusera à ses voisins. F_p choisira alors les objets les plus utiles pour l’ensemble des voisins qui seront capables de recevoir au moins un objet. Finalement, la troisième étape permet d’ordonner les objets choisis en fonction des durées de contacts avec les voisins. En effet, l’ordre des objets peut ne pas avoir un impact sur l’utilité apportée à un sous-ensemble de voisins, mais au contraire, cet ordre peut affecter l’utilité d’un autre sous-ensemble. Donc, il faudra ordonner les objets selon les durées de contacts des voisins. Dans la suite, nous détaillons chacune des trois étapes décrites ci-dessus.

Étape 1 :

F_p ignore l’ensemble des véhicules $\mathcal{V}_{F_p, 0}^t$ ayant des durées de contacts qui ne permettent de recevoir

aucun objet de la part de F_p . Soit $\mathcal{V}_{F_p}^{*t}$ la liste des nœuds voisins de F_p qui peuvent recevoir au moins un objet de F_p (Eq. 3.6).

$$\mathcal{V}_{F_p}^{*t} = \{ v_i \mid v_i \text{ est voisin de } F_p \text{ et } Di, p \geq 1.\Delta t \} \Rightarrow \mathcal{V}_{F_p}^{*t} = \bigcup_{k \neq 0} \mathcal{V}_{F_p, k}^t \quad (3.6)$$

Étape 2 :

Durant la période $[t, t + Time_B]$, en fonction du débit de transmission et de la taille des contenus, F_p peut disséminer au maximum N objets à ses voisins. Par conséquent, chaque véhicule appartenant à $\mathcal{V}_{F_p}^{*t}$ peut recevoir, de F_p , au plus N objets durant la période de temps $[t, t + Time_B]$. Soit $\mathcal{N}_{F_p}^t = \left\{ o_j \mid o_j \in \mathcal{O}_{F_p}^t \text{ et } o_j \text{ sera disséminé par } F_p \text{ pendant } [t, t + Time_B] \right\}$ la liste des objets choisis que F_p dissémine à ses voisins durant $[t, t + Time_B]$. Ce choix sera établi en fonction des intérêts des nœuds. F_p choisit, parmi ses objets $\mathcal{O}_{F_p}^t$, les N objets les plus intéressants pour les nœuds $\mathcal{V}_{F_p}^{*t}$ comme suit :

for $j := 1$ **to** N **do**

$$\mathcal{N}_{F_p}^t(j) = \arg \max_{\substack{o_j \in \mathcal{O}_{F_p}^t \\ o_j \notin \mathcal{N}_{F_p}^t}} \sum_{v_i \in \mathcal{V}_{F_p}^{*t}} I_{i,j}$$

end for

Étape 3 : Après avoir déterminé les N objets à disséminer, F_p ordonne ces derniers en considérant les durées de contacts avec ses voisins.

Nous supposons que les intérêts de l'utilisateur ne changent pas sur une échelle de temps très courte. Par suite, lors d'un échange d'objets, nous considérons que l'utilité acquise par un utilisateur est la même lorsque ce dernier reçoit les mêmes objets dans un ordre différent.

Durant $[t, t + Time_B]$, certains voisins de F_p et qui appartiennent à la liste $\mathcal{V}_{F_p, N}^t$ ont des durées de contacts avec F_p permettant de recevoir la totalité des N objets $\mathcal{N}_{F_p}^t$ qui seront disséminés par F_p . Par conséquent, l'ordre des N objets n'a pas d'importance pour ces voisins puisqu'ils recevront la totalité des objets. En effet, sur une courte période de temps, si un nœud reçoit l'objet o_i d'abord puis l'objet o_j ou l'inverse résulte à la même utilité.

Ensuite, pour généraliser, F_p fonde son ordonnancement sur l'hypothèse suivante ; pour chaque nœud v_i pouvant recevoir k objets, l'ordre des k premiers objets disséminés par F_p n'a pas d'importance puisque v_i pourra recevoir tous les k premiers objets. Bien au contraire, cet ordre a une importance pour les autres nœuds $\mathcal{V}_{F_p, k-1}^t$ qui peuvent recevoir au maximum $(k-1)$ objets. En effet, à titre d'exemple, l'ensemble des véhicules $\mathcal{V}_{F_p, k-1}^t$ préfèrent recevoir les $(k-1)$ objets les plus intéressants d'abord et que le $k^{\text{ème}}$ objet sera le moins intéressant pour eux. Par conséquent, F_p ordonne ses objets comme suit :

for $k := (N - 1)$ **to** 1 **do**

$$\mathcal{L}_{F_p}^t(k+1) = \arg \min_{\substack{o_j \in \mathcal{N}_{F_p}^t \\ o_j \notin \mathcal{L}_{F_p}^t}} \sum_{v_i \in \mathcal{V}_{F_p, k}^t} I_{i,j}$$

end for

3.3.3 Phase 3 : dissémination des objets

Après l'ordonnancement des objets à disséminer, F_p les diffuse à ses nœuds voisins. Ainsi, en suivant cet ordonnancement, chaque *forwarder* F_p maximise la satisfaction des intérêts de ses voisins, et par conséquent, l'utilité totale produite.

4 Évaluation des performances par simulations

Méthodologie suivie

Nous comparons I-PICK avec les deux protocoles de dissémination suivants :

- **Epidemic** : le *forwarder* ordonnance ses objets d'une façon aléatoire.
- **Local-Interest** : Connaissant les intérêts de ses voisins directs, le *forwarder* trie ses objets dans l'ordre de leurs importances aux voisins.
- **Exhaustive search** : la méthode exhaustive permet de tester toutes les combinaisons d'ordonnancement et de choisir localement la meilleure solution. Elle permet donc un choix optimum

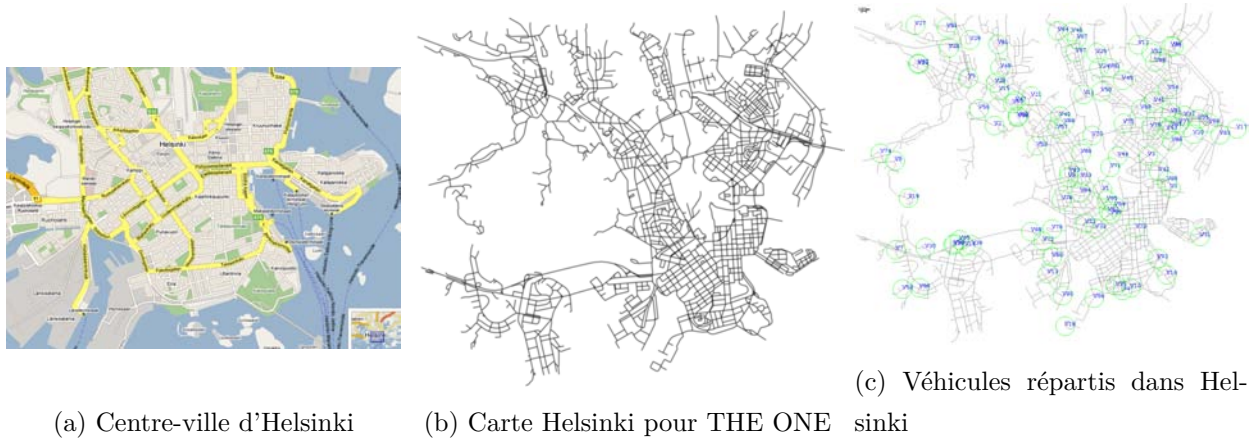


FIGURE 3.4 – Carte d'Helsinki utilisée pour le modèle de mobilité : la fig.(a) montre le centre ville d'Helsinki qui a été converti en une carte adaptée au simulateur THE ONE (fig.(b)) ; la fig.(c) montre un exemple de répartition de véhicules sur cette carte en utilisant le simulateur THE ONE.

local, et non pas un optimum global. La complexité de cette méthode est trop grande dans un cas pratique avec un grand nombre de d'objets et de véhicules.

« *Content utility rate* » est la métrique utilisée pour évaluer les performances des différentes techniques de dissémination, elle est définie comme suivant :

$$\text{Content Utility rate} = \frac{\sum_{o_j \text{ est reçu par } v_i} I_{i,j}}{\sum_{v_i, o_j} I_{i,j}} \quad (3.7)$$

Pour évaluer les performances des différentes méthodes de dissémination, nous avons retenu **THE Opportunistic Network Environment (THE ONE)** en utilisant : (i) des traces réelles de véhicules et aussi (ii) un modèle de mobilité conçu pour les réseaux véhiculaires.

- (i) **Modèle de mobilité** : Nous utilisons une carte existante par défaut dans le simulateur **THE ONE** qui est une région du centre-ville d'Helsinki (Finlande). La figure 3.4 montre la carte utilisée pour le modèle de mobilité. Nous utilisons un modèle de mobilité « *Routed Map-Based Movement* » [KOK09, KKO10], existant dans **THE ONE**, qui sera appliqué à la carte d'Helsinki. Par conséquent, chaque véhicule suit une route prédéterminée sur la carte choisie.
- (ii) **Trace réelle** : Nous utiliserons des mouvements de véhicules externes générés à partir des

traces réelles de véhicules [KOL] sur une zone du centre-ville de Cologne (Allemagne). Le simulateur utilise ainsi les coordonnées géographiques des véhicules, sans nécessiter une carte, pour représenter la mobilité des nœuds. La figure 3.5 montre un scénario comportant 100 véhicules extrait des traces de Cologne.

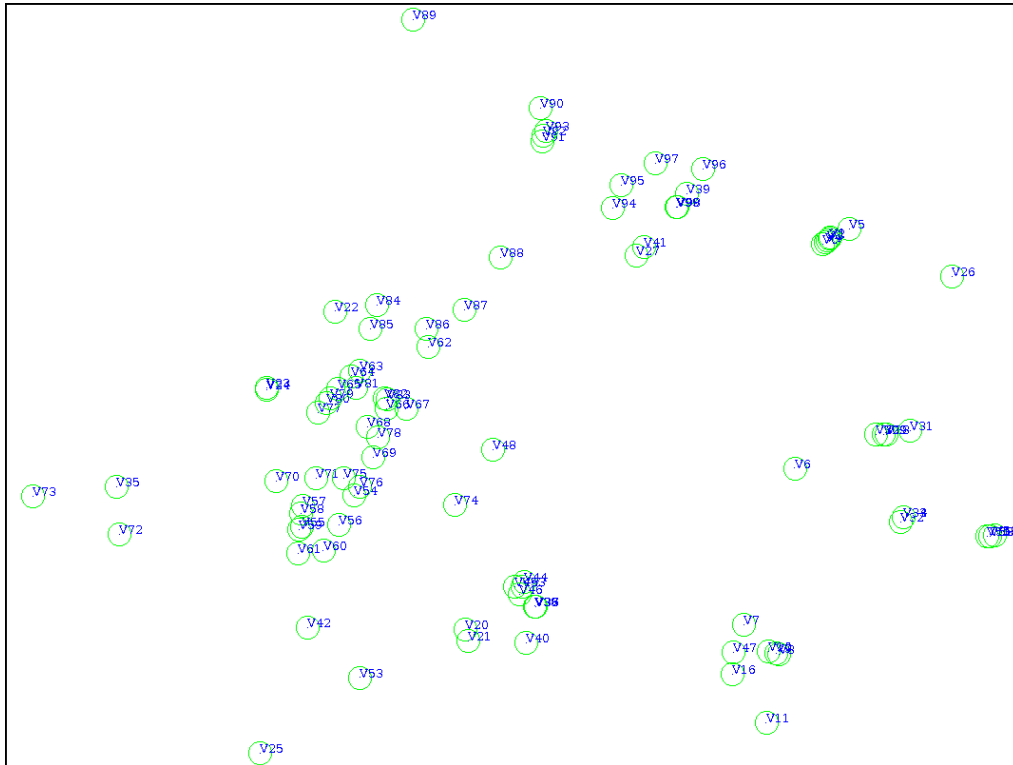


FIGURE 3.5 – Scénario obtenu à partir des traces de Cologne

Pour les premières simulations effectuées, nous considérons un scénario comportant 100 véhicules qui roulent avec des vitesses qui varient entre $15m/s$ et $30m/s$. Chaque véhicule est équipé d'un OBU qui dispose d'une portée de $200m$ et un débit de $6Mb/s$. Les nœuds utilisent les communications V2V pour échanger les contenus. Au début des simulations, 400 objets de même taille $1MB$ et avec une durée de vie TTL de 1 heure sont créés et distribués aléatoirement sur 5 nœuds (i.e. sources initiales). Pour chaque nœud, les intérêts sont choisis aléatoirement selon une distribution uniforme. Lorsqu'un nœud reçoit un objet pour la première fois (i.e. le nœud n'a pas reçu le même objet

auparavant), il recevra alors une utilité qui est égale à son intérêt pour l'objet reçu. Nous considérons que la mémoire de chaque nœud est suffisamment grande pour permettre de recevoir tous les objets présents dans le réseau. Les simulations s'arrêtent lorsque la durée de vie de tous les objets expire.

Content Utility rate : Modèle de mobilité et Trace véhiculaire

La figure 3.6 montre l'utilité produite en fonction du temps pour les différentes méthodes de dissémination en utilisant le modèle de mobilité (figure 3.6a) puis les traces véhiculaires (figure 3.6b).

Les résultats obtenus montrent que **I-PICK** produit plus d'utilité que les autres méthodes. En effet, lorsque tous les objets ont expiré, **I-PICK** a satisfait 79.85% des intérêts de tous les nœuds alors que Local-Interest et Epidemic ont satisfait 70.63% et 60.06% des intérêts des nœuds, respectivement. Des résultats similaires ont été obtenus en utilisant les traces véhiculaires. La figure 3.6b montre que **I-PICK** se révèle plus performant et conduit à un taux d'utilité de 70.02% alors que Local-Interest et Epidemic ont atteint des valeurs de 61.96% et 56.15% d'utilité, respectivement.

Les résultats montrent aussi que la méthode Exhaustive atteint des valeurs d'utilité légèrement meilleures que celles de **I-PICK**. En revanche, elle présente une grande complexité ce qui prend alors un long temps de calcul et de traitement. La durée d'exécution de la simulation de la méthode gloutonne est d'environ 3 jours dans notre scénario alors que cette durée est égale à 1 jour en utilisant **I-PICK** et Local-Interest. Quant à la méthode aléatoire, cette durée est d'environ 10 heures. La méthode gloutonne reste difficile à déployer dans la pratique.

La différence des résultats obtenus entre le modèle de mobilité et les traces véhiculaires sont dues à plusieurs facteurs tels que la mobilité des nœuds, le nombre de contacts entre les nœuds, certains nœuds apparaissent, d'autres disparaissent (dans le cas des traces de véhicules). Par exemple, lorsque la fréquence de contacts entre les nœuds augmente, cela permet d'échanger un volume de contenus plus important et apporter ainsi plus d'utilité.

Ces premières résultats prouvent l'importance des intérêts des utilisateurs ainsi que de la durée de leurs contacts pour maximiser la satisfaction des intérêts des utilisateurs. En considérant ces derniers, **I-PICK** nécessite moins de temps pour atteindre la même valeur d'utilité que les méthodes Local-Interest et Epidemic. Par exemple, la Figure 3.6a montre que **I-PICK** nécessite 44 min pour

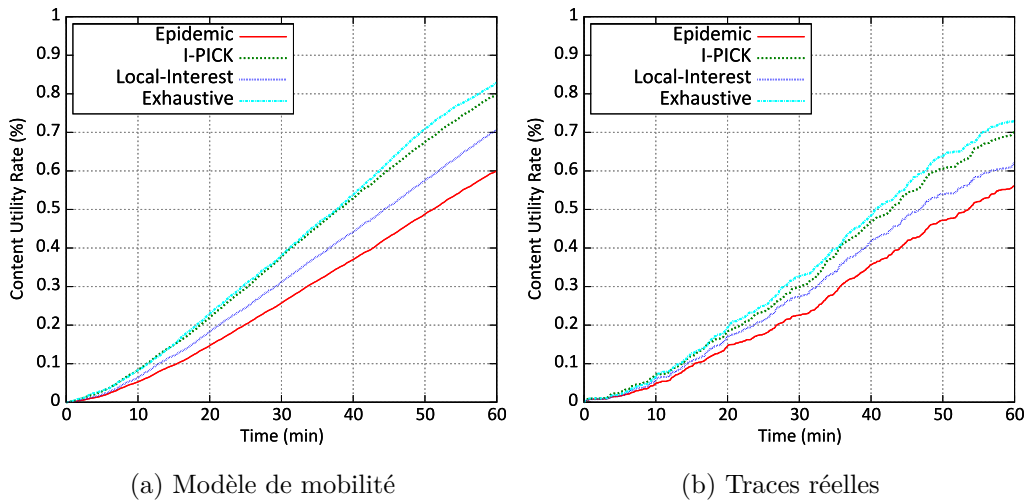


FIGURE 3.6 – Taux d'utilité produit en fonction du temps

satisfaire 60% des intérêts des utilisateurs alors que Local-Interest et Epidemic nécessitent 52 min et 60 min, respectivement. Ces différences sont significatives.

Dans la suite, nous validons la performance de **I-PICK** par rapport à Local-Interest dans différents environnements.

Impact des paramètres du réseau et de l'utilisateur

Dans cette partie, nous évaluons les performances de notre proposition dans plusieurs environnements. Pour cela, nous faisons varier les paramètres de simulations suivants : *(i)* nombre d'objets créés, *(ii)* taille des objets, *(iii)* densité du réseau (i.e. nombre de véhicules), *(iv)* capacité de stockage des nœuds avec deux techniques de rejet d'objets, et nous utilisons aussi une autre *(v)* distribution d'intérêts en utilisant la loi de *Zipf*.

Tout d'abord, nous commençons par faire varier les paramètres liés aux objets. La figure 3.7 montre les résultats obtenus pour différentes valeurs de la taille des objets (1 ~ 3MB) et du nombre des objets engendrés (200 ~ 500). La figure 3.7a montre que **I-PICK** s'avère plus performant que Local-Interest pour différentes tailles d'objets. Lorsque la taille des objets diminue, les durées de contacts permettent d'échanger plus d'objets et par conséquent l'impact des durées de contact sur

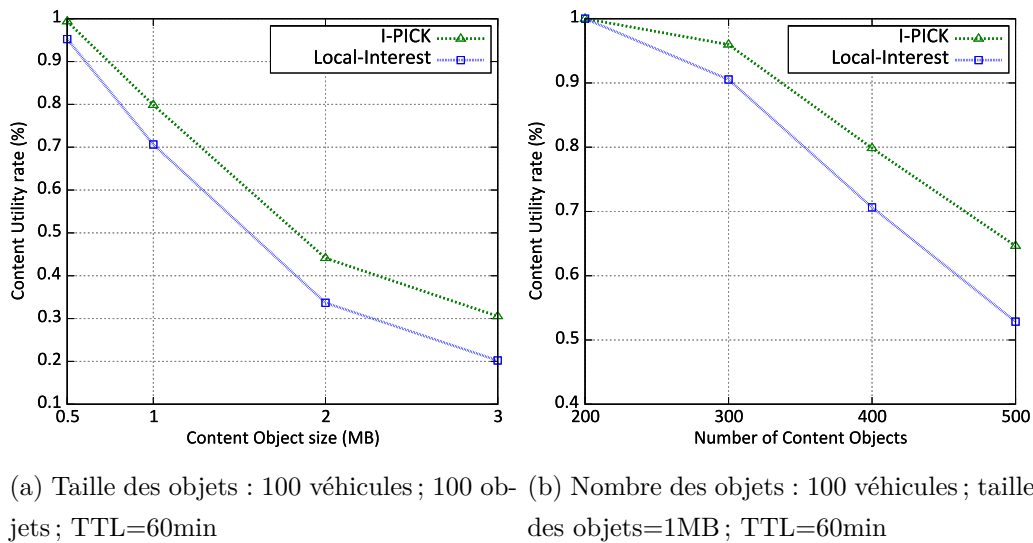


FIGURE 3.7 – Taux d'utilité produit en fonction du nombre et de la taille des objets

l'utilité produite diminue. Cela explique la diminution du gain réalisé pour une petite taille d'objets.

Dans la figure 3.7b, nous remarquons que lorsque le nombre d'objets augmente, I-PICK se montre plus performant et fournit une meilleure utilité que Local-Interest. En effet, l'augmentation du nombre d'objets réduit relativement la proportion de contenus qui peut être échangé. Cela a donc plus d'impact sur l'utilité des utilisateurs. Il sera donc plus important de disséminer les contenus d'une manière efficace afin de satisfaire au maximum les intérêts des utilisateurs surtout quand les objets présentent des durées de vie limitées. Nous remarquons aussi, que pour 200 objets, les deux méthodes atteignent la même valeur d'utilité à la fin de simulation. En effet, un faible nombre d'objets nécessite des durées de contact moindres entre les nœuds pour pouvoir échanger tous les contenus présents dans le réseau. Dans ce cas, I-PICK et Local-Interest ont suffisamment de temps pour disséminer tous les objets intéressants avant leur expiration.

Nous évaluons ensuite notre proposition en faisant varier la densité du réseau. Pour cela, nous utilisons la même carte géographique (Helsinki) et le nombre de véhicules varie entre 50 et 200. La figure 3.8 montre l'utilité produite en fonction du nombre de véhicules. D'une part, lorsque la densité du réseau diminue, le nombre de contacts entre les nœuds diminue à son tour. Par conséquent,

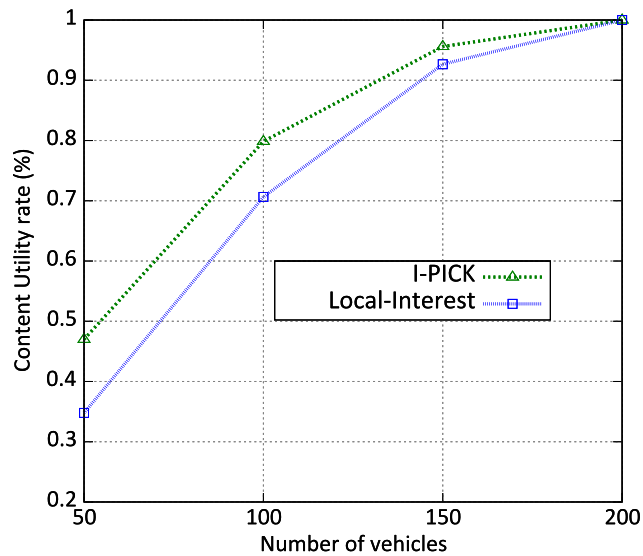


FIGURE 3.8 – Content Utility en fonction du nombre de véhicules (carte d’Helsinki ; 400 objets ; Taille des objets=1MB ; TTL=60min)

l’impact des durées de contacts sur l’échange de contenus sera de plus en plus important, ce qui explique l’augmentation du gain réalisé par **I-PICK** par rapport à Local-Interest. Le phénomène inverse apparaît à forte densité. Avec un scénario de 200 véhicules (très dense dans notre cas), **I-PICK** et Local-Interest satisfont 100% des intérêts des utilisateurs.

Le risque d’interruption des échanges de contenu est plus fréquent dans les réseaux véhiculaires que dans autres types de réseaux, en raison des faibles durées de contacts entre les véhicules. Pour remédier à ce problème, **I-PICK** estime les durées de contacts et par suite le nombre d’objets que peut recevoir un nœud, ce qui permet d’améliorer la dissémination afin de satisfaire au maximum les intérêts des utilisateurs. Pour cette raison, considérer uniquement les intérêts des utilisateurs reste insuffisant à l’exception des situations dans lesquelles il y a peu de contenus à échanger avec un nombre de contacts important entre les véhicules. Cette situation est possible lorsque les véhicules sont quasiment immobiles (e.g. embouteillage) qui est un cas très particulier.

D’autres paramètres peuvent être utilisés pour améliorer la dissémination tels que “le nombre de contacts” et “les futurs contacts”. La connaissance *a priori* de ces informations peut être utilisée

pour maximiser la valeur du *Content Utility rate*. En raison de la topologie dynamique des réseaux véhiculaires, la prédiction de ces paramètres est un défi difficile.

Dans la suite, nous supposons que les utilisateurs expriment leurs intérêts selon une distribution de *Zipf* [BCF⁺99]. Nous définissons donc un scénario dans lequel il y aura un volume faible de contenus populaires (très intéressants pour la plupart des utilisateurs) et aussi un volume de contenus non-populaires (moins intéressants ou intéressant moins de monde). Le volume de contenus non-populaires est significativement plus grand que le volume de contenus populaires. Les intérêts sont alors exprimés en utilisant une distribution de *Zipf* avec un exposant α égal à 1 comme dans [GC11]. Nous faisons varier la mémoire de stockage qui sera exprimée en termes de nombres d'objets que chaque nœud peut stocker (100 ~ 400). Quand la capacité de stockage d'un nœud est saturée, nous utilisons deux méthodes de rejet des objets; (i) *Lowest-Interest* qui consiste à rejeter l'objet le moins intéressant pour le nœud considéré, et (ii) *Oldest* qui consiste à rejeter l'objet le plus ancien.

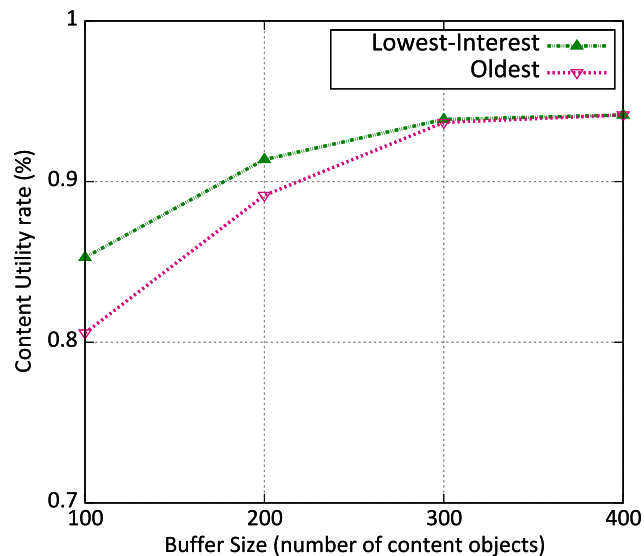


FIGURE 3.9 – Distribution de *Zipf* : Impact de la capacité de stockage et de la technique de rejet sur l'utilité (400 objets; Taille des objets=1MB; TTL=60min)

La Figure 3.9 montre le taux d'utilité obtenu par *I-PICK* en fonction de la capacité de stockage. Lorsque la capacité de stockage est suffisamment grande (i.e. capacité=400 objets, c'est-à-dire que

chaque nœud peut recevoir tous les objets dans le réseau), **I-PICK** permet de satisfaire plus d'intérêts des utilisateurs avec la distribution de *Zipf* qu'avec la distribution uniforme. En effet, **I-PICK** atteint 94.14% avec la distribution de *Zipf* (figure 3.9) et 79.85% avec la loi uniforme (figure 3.6a). Ceci est dû à l'existence de contenus non-populaires que **I-PICK** ne dissémine pas aux utilisateurs non intéressés.

Lorsque la capacité de stockage diminue, l'utilité diminue aussi puisque les nœuds peuvent rejeter des objets qui intéressent d'autres nœuds. Nous remarquons qu'avec la distribution de *Zipf*, rejeter les objets les moins intéressants est plus performant que de rejeter les objets les plus anciens. Cela peut être justifié par le fait que, la plupart des nœuds vont garder les objets qui sont populaires et intéressent la majorité des nœuds. Avec une loi uniforme, cela n'aurait qu'un impact marginal, l'intérêt qu'un nœud apporte à un objet ne préjuge en rien de l'intérêt que vont y trouver ses futurs contacts.

5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé un nouveau protocole de dissémination **I-PICK** qui, contrairement aux méthodes de la littérature, a pour objectif de satisfaire les intérêts des utilisateurs. Pour ce faire **I-PICK** considère les intérêts des utilisateurs ainsi que la durée de leurs contacts afin de maximiser la valeur de la métrique « Content Utility Rate », que nous avons proposée. Nous avons montré par simulation l'efficacité de **I-PICK** par rapport à d'autres méthodes; une qui considère uniquement les intérêts des utilisateurs et l'autre qui est aléatoire. Nous avons montré que, pour produire une même valeur d'utilité aux utilisateurs, **I-PICK** nécessite moins de temps que les autres méthodes.

CHAPITRE 4

I-SEND : Comment choisir les relais ?

Sommaire

1	Motivation	61
2	Illustration sur un exemple simple	62
3	I-SEND sélection de relais fondée sur l'utilité	64
3.1	Système considéré	65
3.2	Formulation du problème	65
3.3	Description détaillée de I-SEND	66
3.3.1	Phase 1 : Découverte de voisins et de leurs intérêts	66
3.3.2	Phase 2 : Estimation de l'utilité qu'un nœud peut apporter à ses voisins	68
3.3.3	Phase 3 : Envoi des objets	69
3.3.4	Phase 4 : Annulation et réception des objets	70
4	Évaluation des performances par simulations	70
4.1	Méthodologie suivie	70
4.2	Résultats	71
5	Conclusion	75

1 Motivation

Dans le chapitre précédent, nous avons montré comment un *forwarder* pourrait envoyer ses contenus d'une manière efficace afin de répondre aux préférences des nœuds voisins. Dans la suite, nous nous intéressons au choix des *forwarders*. Ce choix doit être fait de façon à relever différents défis tels que : ne pas congestionner le réseau, ce qui peut être causé par plusieurs nœuds qui envoient leurs contenus ; éviter les collisions et essentiellement répondre aux préférences des utilisateurs.

Dans la littérature, la sélection des *forwarders* a globalement porté sur l'objectif de maximiser la couverture de la propagation des contenus et de réduire l'*overhead* provoqué sur le réseau.

Dans le contexte des applications de confort et de divertissement, nous ajoutons un autre critère important qui est l'utilité produite auprès des usagers routiers en fonction des contenus reçus. Par

conséquent, pour répondre au maximum aux intérêts des utilisateurs, nous avons proposé, dans ce qui suit, un nouvel algorithme de sélection de *forwarder* qui porte sur l'estimation de l'utilité produite.

Dans nos algorithmes, nous ne considérons pour une période de temps $Time_B$ qu'un seul *forwarder*. Sinon, cela imposerait que les nœuds aient une connaissance complète des intérêts et des objets contenus dans un voisinage à un saut au moins sur la période $Time_B$. Ce poserait encore des problèmes de synchronisation fine, de stations cachées...

2 Illustration sur un exemple simple

La figure 4.1 illustre un scénario simple pour motiver notre démarche composé de 4 véhicules. À un instant t , chaque véhicule v_i possède une liste d'objets \mathcal{O}_{v_i} . Pour simplifier et sans perte de généralité, nous supposons que les différents objets sont de même taille et que Δt représente la durée nécessaire pour disséminer/recevoir un objet. Les liens de communications entre les véhicules sont maintenus pendant des durées de contacts limitées et qui sont exprimées en fonction de Δt (voir figure 4.1). Dans l'exemple, chaque véhicule est associé à un usager routier ayant des intérêts hétérogènes pour les contenus présents dans le réseau comme montré dans le tableau 4.1.

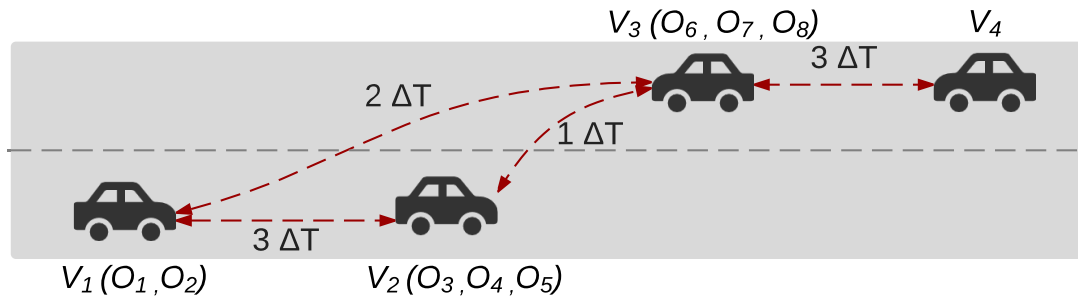


FIGURE 4.1 – Scénario de motivation

Dans le scénario illustré, lorsque les véhicules v_1, v_2, v_3, v_4 entrent en communication d'une façon opportuniste, un seul nœud sera choisi comme *forwarder*. Nous retenons ici deux méthodes de sélection de *forwarder* : (i) *centrality-based forwarding scheme* et (ii) *utility based forwarder scheme*.

- **Centrality-based forwarding scheme** : afin d'augmenter le nombre d'objets envoyés, cette

\mathcal{O}_{v_1}	\mathbf{O}_1	\mathbf{O}_2
I_{v_i, o_j}		
V_2	2	3
V_3	4	4
Σ	6	7

\mathcal{O}_{v_2}	\mathbf{O}_3	\mathbf{O}_4	\mathbf{O}_5
I_{v_i, o_j}			
V_1	5	5	4
V_3	2	5	1
Σ	7	10	5

\mathcal{O}_{v_3}	\mathbf{O}_6	\mathbf{O}_7	\mathbf{O}_8
I_{v_i, o_j}			
V_1	3	2	1
V_2	1	4	0
V_4	1	2	2
Σ	5	8	3

TABLE 4.1 – Préférences des nœuds

méthode désigne le nœud ayant le maximum de voisins comme *forwarder*. Par conséquent, le véhicule v_3 sera choisi pour envoyer ses objets à ses voisins puisqu'il possède un degré égal à 3. Pour maximiser la satisfaction des intérêts de ses voisins, v_3 envoie ses objets dans l'ordre suivant : $[o_7, o_6, o_8]$ et produit ainsi l'utilité suivante :

$$\begin{aligned} \text{Utilité}_3 &= (I_{v_1, o_7} + I_{v_2, o_7} + I_{v_4, o_7}) + (I_{v_1, o_6} + I_{v_4, o_6}) + I_{v_4, o_8} \\ &= (2 + 4 + 2) + (3 + 1) + 2 = 14 \end{aligned}$$

- **Utility-based forwarding scheme** : même si la première méthode permet d'augmenter le nombre d'objets disséminés, elle peut ne pas maximiser la satisfaction des intérêts des nœuds. En effet, dans un premier temps, un nœud peut avoir plusieurs voisins mais au contraire des faibles durées de contact avec eux permettant d'envoyer un faible volume de contenus. Dans un deuxième temps, il se peut que les objets envoyés sont inintéressants ou peu intéressants pour ses voisins.

Par suite, la méthode de sélection de *forwarder*, *utility-based*, choisit le nœud qui permet de maximiser la satisfaction des intérêts de ses voisins. Pour ce faire, cette méthode considère à la fois les intérêts des utilisateurs ainsi que leurs durées de contacts. Après avoir estimé la valeur d'utilité que peut produire chaque nœud, le *forwarder* sera choisi comme le nœud qui peut produire une utilité maximale, ce qui permet par conséquent d'augmenter l'utilité totale produite.

À cet effet, v_1 , v_2 et v_3 envoient leurs objets comme suit $[o_2, o_1]$, $[o_4, o_3, o_5]$ et $[o_7, o_6, o_8]$, respectivement. Les différentes utilités qui peuvent être produites par chacun des nœuds sont :

- Utilité₁ = $(I_{v_2,o_2} + I_{v_3,o_2}) + (I_{v_2,o_1} + I_{v_3,o_1}) = (3+4) + (2+4) = 13$
- Utilité₂ = $(I_{v_1,o_4} + I_{v_3,o_4}) + I_{v_1,o_3} + I_{v_1,o_5} = (5+5) + 5 + 4 = 19$
- Utilité₃ = $(I_{v_1,o_7} + I_{v_2,o_7} + I_{v_4,o_7}) + (I_{v_1,o_6} + I_{v_4,o_6}) + I_{v_4,o_8} = (2+4+2) + (3+1) + 2 = 14$
- Utilité₄ = 0 (i.e. v_4 ne possède aucun objet)

Par conséquent, en utilisant la méthode *utility-based*, le nœud qui peut produire le maximum d'utilité sera choisi comme *forwarder* F .

$$F = \underset{j}{\operatorname{argmax}} \{ \text{Utilité}_j \} \Rightarrow F = v_2$$

Donc, dans cet exemple de scénario, v_2 sera choisi comme *forwarder* et dissémine ses contenus à ses voisins.

Afin de maximiser la couverture de propagation des contenus, plusieurs approches de sélection de *forwarders* sont fondées sur le principe de degré de centralité des nœuds. Cela peut être efficace lorsqu'il s'agit d'un seul type de contenus à disséminer qui intéresse tous les nœuds (e.g. information de sécurité). Cela nécessite alors de choisir les nœuds permettant de relayer les contenus à un grand nombre de nœuds. Au contraire, lorsqu'un nombre important de contenus existent avec des intérêts hétérogènes, un nœud peut produire un maximum d'utilité en relayant un ensemble de ces contenus même s'il n'a pas le degré de centralité le plus élevé ou même encore s'il ne possède que peu de contenus.

3 I-SEND sélection de relais fondée sur l'utilité

Dans cette section nous allons détailler notre nouvelle approche de sélection de *forwarder*, nommée *utility-based forwarder selection for content Dissemination in vehicular networks (I-SEND)*. Afin de préserver une bonne performance de la dissémination de contenus dans les réseaux véhiculaires, l'objectif d'**I-SEND** consiste à accroître l'utilité (i.e. *content utility*) des utilisateurs finaux dans le contexte des applications d'informations et de divertissement. Dans ce qui suit, un aperçu du système considéré est présenté, suivi par une explication détaillée d'**I-SEND**.

3.1 Système considéré

Nous considérons un ensemble de véhicules $\mathcal{V} = \{v_i \mid i \text{ est l'identité du véhicule}\}$ qui se déplacent. Les véhicules sont équipés d'OBUs permettant de communiquer et d'échanger des contenus avec les nœuds voisins. L'égoïsme des nœuds n'est pas considéré dans ce mémoire, nous supposons que les nœuds coopèrent.

De même que dans le chapitre 3 (sous-section 3.3.1), les nœuds échangent périodiquement des messages de *beacon* pour la découverte de voisins et de leurs préférences. Soit $\mathcal{V}_{v_m}^t = \{v_i \mid v_i \text{ est voisin de } v_m\}$ la liste des voisins de v_m à l'instant t , avec $\mathcal{V}_{v_m}^t \subseteq \mathcal{V}$. Quand des nœuds voisins entrent en communication, un nœud relais F_p sera alors désigné pour disséminer ses contenus.

Soient $\mathcal{O} = \{o_j\}$ et $\mathcal{O}_{v_i}^t = \{o_j \mid o_j \in \text{mémoire de } v_i \text{ à l'instant } t\}$ les ensembles d'objets engendrés dans le réseau et des objets stockés par v_i à l'instant t , respectivement. Les intérêts des nœuds pour les différentes thématiques et objets seront exprimés comme dans la section 3 du chapitre précédent. Pour simplifier et sans perte de généralité, dans ce travail, nous supposons que les objets ont la même taille. Donc nous notons Δt la durée nécessaire pour disséminer un objet d'un nœud à ses voisins.

Un nœud sera en communication avec ses voisins $\mathcal{V}_{v_m}^t$ pour différentes durées de contacts. Soit, $D_{i,m}$ la durée de contact entre v_i et v_m exprimée en fonction de Δt .

3.2 Formulation du problème

Lorsque les objets atteignent la limite de leur durée de vie, nous calculons la satisfaction des nœuds par rapport aux objets reçus comme le montre l'équation 4.1.

$$\text{Content Utility rate} = \frac{\sum_{o_j \text{ est reçu par } v_i} I_{i,j}}{\sum_{v_i, o_j} I_{i,j}} \quad (4.1)$$

Quand les nœuds entrent en communication, un *forwarder* sera choisi pour diffuser un sous-ensemble de ses contenus à ses voisins. Pour répondre au maximum aux préférences des utilisateurs par rapport aux objets reçus, l'objectif est de sélectionner les relais de façon à maximiser le *Content Utility rate* produit après l'expiration des objets.

Si l'on considère $U^t(F_p)$ l'utilité locale que peut apporter F_p à ses voisins l'instant t , l'objectif est alors de répondre à cette question : Quels *forwarders* faut-il choisir sur toutes les communications qui vont avoir lieu présentes et à venir afin de maximiser l'utilité globale (équation 4.2).

$$\text{Utilité globale} = \sum_{\substack{F_p \\ t \leq T_{max}}} U^t(F_p); \text{ où } T_{max} \text{ représente l'expiration des objets} \quad (4.2)$$

Il est difficile de répondre à cette problématique pour plusieurs raisons. Tout d'abord, nous ne connaissons pas les futurs contacts d'un nœud, ce qui rend difficile la détermination d'une solution optimale du début de création des objets jusqu'à leur expiration. De plus, choisir un *forwarder* à un instant t peut être efficace comme choix à l'instant courant mais pas nécessairement dans le futur (e.g. les objets envoyés par un *forwarder* peuvent être utiles pour ses voisins directs mais pas à leurs futurs contacts). Par ailleurs, lorsqu'un *forwarder* possède plusieurs contenus, quels contenus doit-il envoyer ? et dans quel ordre doit-il les procéder ?

Plusieurs contraintes rendent difficile la sélection de *forwarder*. Ne connaissant pas l'état futur du réseau véhiculaire, nous avons choisi de diviser encore l'échelle de temps en laps de temps. Un laps de temps correspond à une courte période de temps pendant laquelle un *forwarder* peut avoir une vision locale de ses voisins. Ensuite, nous avons opté pour une solution dont le principe est de relayer les contenus en utilisant les nœuds permettant de produire un maximum d'utilité à leurs voisins.

Dans la suite, nous détaillons notre approche de sélection de *forwarder*, appelé **I-SEND**.

3.3 Description détaillée de I-SEND

La figure 4.2 illustre le mécanisme de sélection du *forwarder* fondé sur l'utilité et qui se compose de quatre étapes principales : (i) réception des messages de *beacon*, (ii) calcul de l'utilité et (iii) dissémination des objets (i.e. *forwarder*) ou (iv) annulation (i.e. *receiver*). Dans ce qui suit, nous allons détailler chacune de ces étapes.

3.3.1 Phase 1 : Découverte de voisins et de leurs intérêts

Comme expliqué auparavant dans la section 3.3.1 du chapitre 3, les nœuds échangent périodiquement des messages de *beacon* permettant la découverte des nœuds voisins ainsi que leurs intérêts. Le

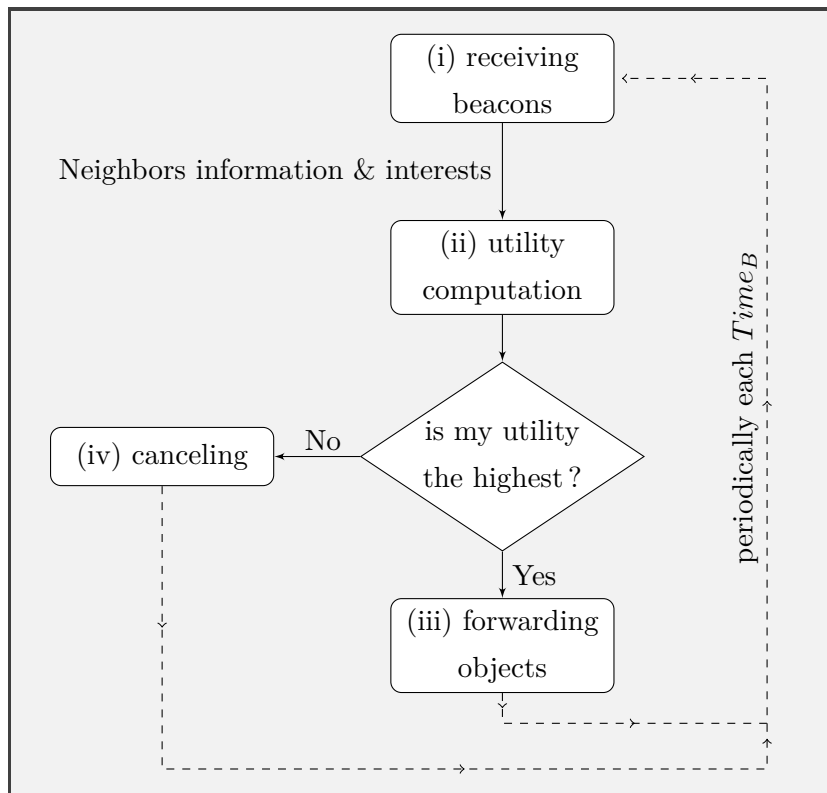


FIGURE 4.2 – Forwarder selection scheme

message de *beacon* que nous utilisons est conforme à celui utilisé dans le travail [DBB13] et il a la forme suivante :

$$\langle x, y, s, \vec{dir}, seq \rangle$$

où le couple (x, y) représente les coordonnées géographiques (i.e. emplacement actuel) du véhicule ; 's' et \vec{dir} représentent la vitesse et la direction du véhicule, respectivement ; et 'seq' est une séquence qui contient les intérêts de l'utilisateur. Les messages de *beacon* sont envoyés périodiquement ($Time_B$ secondes).

3.3.2 Phase 2 : Estimation de l'utilité qu'un nœud peut apporter à ses voisins

Nous supposons qu'une synchronisation locale est établie entre les nœuds. Après avoir reçu les messages de *beacon*, chaque nœud calcule la valeur d'utilité qu'il peut ajouter à ses voisins. Cette utilité représente le taux de satisfaction des intérêts que peut ajouter un nœud à ses voisins après avoir disséminé un ensemble de contenus. Pour ce faire, un nœud nécessite deux types d'informations qui sont : les préférences des nœuds voisins et les durées de communications avec ces derniers. La première (i.e. préférences des utilisateurs) est le champ *seq* trouvé dans le message de *beacon*. La seconde (i.e. durée de contact) est estimée en utilisant la position (x, y) , la direction (\vec{dir}) et la vitesse (s) du nœud voisin qui sont aussi contenues dans le message de *beacon*.

Pour une estimation plus fiable, les durées de contact sont regardées sur une courte échelle de temps (i.e. période de temps entre échanges des messages de *beacon*) qui est de l'ordre de quelques secondes.

L'utilité calculée correspond à la valeur maximale d'utilité qu'un nœud peut ajouter à ses voisins. Elle se calcule en se référant à l'algorithme d'ordonnancement expliqué dans le chapitre 3 dans la sous-section 3.3.2 (étapes 1, 2 et 3) qui permet d'aboutir à la liste finale des objets ordonnés $\mathcal{L}_{v_i}^t$. En envoyant la liste des objets $\mathcal{L}_{v_i}^t$ durant la période de temps $[t, t + Time_B]$, v_i peut ajouter à ses voisins l'utilité suivante (équation 4.3) :

$$U_{v_i}^t = \sum_{\substack{j=1 \\ v_m \in \mathcal{V}_{v_i}^{*t} \\ \mathcal{L}_{v_i}^t(j) \notin \mathcal{O}_{v_m}^t}}^{\frac{D_{i,m}}{\Delta t}} \text{Intérêt}(v_m, \mathcal{L}_{v_i}^t(j)) \quad (4.3)$$

avec : $\text{Intérêt}(v_m, \mathcal{L}_{v_i}^t(j))$ est l'intérêt du nœud v_m pour l'objet $\mathcal{L}_{v_i}^t(j)$.

Ces valeurs ne sont connues que localement. Pour éviter d'alourdir notre protocole en ajoutant des messages renvoyant ces résultants et permettant de déterminer le nœud le plus utile, nous utilisons un mécanisme classique de temporisation.

Calcul et déclenchement du temporisateur

Notre objectif étant de répondre au maximum aux intérêts des usagers routiers, nous devons choisir comme *forwarders* les nœuds qui permettent de produire le plus d'utilité.

Tenir compte des positions courantes des véhicules, de leurs portées respectives serait très compliqué et risquerait encore une fois d'alourdir le protocole. Nous nous concentrons sur une solution complètement distribuée.

Chaque nœud calcule un temporisateur qui est inversement proportionnel à sa valeur d'utilité comme montré dans l'équation 4.4.

$$\text{Temporisateur} = \frac{\alpha}{\text{utilité}} + \text{rand} \quad (4.4)$$

où α est une constante et *rand* une valeur aléatoire. Le choix de ces paramètres doit être établi de façon optimale afin de garantir deux points principaux :

- la durée du temporisateur sera faible pour ne pas gaspiller le temps de communication et d'échange de contenus
- Les temporisateurs des nœuds en communication ne doivent pas aboutir à un envoi simultané des contenus.

De nombreuses idées nous sont apparues pour tenir compte de la densité des nœuds ou du paramètre $Time_B$. Δt étant assez grand, une valeur entière risque d'être pénalisante car finalement on risque de perdre beaucoup de temps voire surtout d'augmenter les risques de collision avec de nombreux véhicules choisissant la même valeur. Le simulateur [THE ONE](#) n'étant pas très solide sur les couches basses, il était difficile d'aller beaucoup plus loin dans cette première phase. En revanche, dans le chapitre suivant, qui concerne l'expérimentation en vraie grandeur de ces solutions, nous reviendrons sur cette discussion avec des surprises assez importantes.

Quand le temporisateur expire il enverra les données qu'un autre nœud l'ait devancé.

3.3.3 Phase 3 : Envoi des objets

Le *forwarder* qui vient d'être désigné (temporisation la plus faible) envoie alors la liste des objets à ses voisins dans l'ordre qu'il a calculé jusqu'au prochain échange de messages de *beacon*.

3.3.4 Phase 4 : Annulation et réception des objets

Un nœud annule sa transmission lorsqu'il commence à recevoir des contenus de ses voisins avant l'expiration de son temporisateur. Il joue le rôle de *receiver*.

4 Évaluation des performances par simulations

4.1 Méthodologie suivie

Pour valider notre algorithme de sélection de *forwarder*, des simulations ont été effectuées en utilisant le simulateur [THE ONE](#) [KOK09] et un ensemble de traces de véhicules extraites de traces réelles de véhicules [PSDG09] ainsi qu'un modèle de mobilité [KKO10] spécifique pour le déplacement des véhicules sur une carte de taille $8500\text{ m} \times 6000\text{ m}$.

Dans notre scénario, nous considérons un nombre de 100 véhicules qui se déplacent avec des vitesses qui varient de 16 à 33 m/s. Chaque véhicule est équipé par un dispositif [OBU](#) permettant la communication avec d'autres nœuds avec une portée de transmission de 200 m et un débit de 6 Mbit/s. Au début des simulations, 1000 objets de même taille sont créés et distribués aléatoirement sur un ensemble de 10 sources initiales. Chaque nœud exprime ses intérêts aléatoirement avec une distribution uniforme pour les différents objets.

Nous évaluons les performances de [I-SEND](#) en faisant varier différents paramètres tels que la capacité de stockage des nœuds (200~700 objects), la durée de vie des objets TTL (10~80 min) et la taille des objets (1~3 Mb).

Dans la littérature, plusieurs solutions utilisant l'échange de messages de *beacon* entre les véhicules ont été proposées avec des périodes variant dans l'intervalle $[3s, 5s]$ [DBB13, LMG⁺09, SOS⁺14]. Nous avons fixé la période d'échange des messages de beacon $Time_B$ à 4 s.

Nous comparons [I-SEND](#) avec les deux algorithmes de sélection de *forwarder* suivants :

- **Highest Degree** : cette méthode consiste à choisir le nœud ayant la centralité la plus élevée (i.e. nombre de liens) comme *forwarder* [DH07]. Ce *forwarder* est considéré comme un nœud qui joue un rôle vital par rapport aux autres en raison du nombre de liens élevé ce qui favorise la propagation des contenus.

- **Enhanced-Highest Degree** : cet algorithme est une amélioration de *Highest-Degree*. Après avoir choisi comme *forwarder* le nœud ayant la centralité la plus élevée, cet algorithme permet au *forwarder* d'ordonner la liste des objets à disséminer afin de maximiser l'utilité des voisins.

Pour quelle raison comparer avec des algorithmes fondés sur la centralité ?

Plusieurs approches de sélection de *forwarder* ont été proposées. La plupart de ces approches ont été fondées sur différents critères pour déterminer comme relais les nœuds qui ont des rôles vitaux parmi tous les nœuds présents dans le réseau. Elles utilisent généralement la centralité comme critère pour la sélection des nœuds relais. Ces critères sont principalement la centralité et les relations sociales du nœud. De plus, ces approches ont montré des résultats qui soulignent que la centralité des nœuds est un facteur principal donnant le meilleur compromis en termes de performance [XLL⁺13]. C'est pour cela que nous avons choisi de comparer notre proposition avec des algorithmes qui considèrent la centralité des nœuds pour désigner les *forwarders*.

Les évaluations retiennent *Content Utility rate*, et ses variations, comme métrique pour comparer la performance d'I-SEND avec les autres algorithmes mentionnés ci-dessus. Cette métrique est calculée comme suit (équation 4.5) :

$$\text{Content Utility rate} = \frac{\sum_{o_j \text{ est reçu par } v_i} I_{i,j}}{\sum_{v_i, o_j} I_{i,j}} \quad (4.5)$$

4.2 Résultats

Dans un premier scénario, nous supposons que les nœuds ont suffisamment de capacité de stockage leur permettant de recevoir la totalité des objets. Les durées de vie sont de 60 min. Les simulations sont menées jusqu'à l'expiration des objets.

Les figures 4.3 et 4.4 présentent le *content utility rate* produit dans le réseau en fonction du temps en utilisant le modèle de mobilité et les traces réelles, respectivement.

La figure 4.3 montre, avec un modèle de mobilité, qu'I-SEND s'avère plus performant que les autres algorithmes. En effet, à la fin de la simulation, I-SEND atteint 95.17% d'utilité tandis que

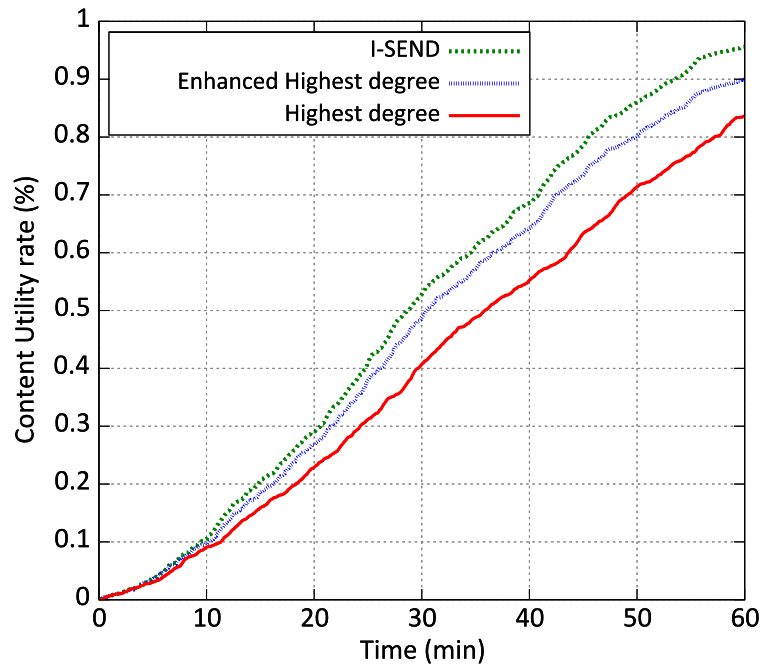


FIGURE 4.3 – Modèle de mobilité : Taux d'utilité produit en fonction du temps

Highest-degree et *Enhanced-Highest degree* produisent 83.13% et 89.46%, respectivement. De même on peut observer que, pour satisfaire 80% des intérêts des utilisateurs, *I-SEND* nécessite 46.2 min alors que *Highest-degree* et *Enhanced-Highest degree* nécessitent 58.15 min et 50.6 min, respectivement.

De la même façon, avec des traces réelles, la figure 4.4 montre qu'*I-SEND* produit plus d'utilité que les autres méthodes. En effet, après l'expiration des objets *I-SEND* a atteint 76.50% d'utilité tandis que *Highest-degree* et *Enhanced-Highest degree* ont atteint 61.34% et 72%, respectivement. Par ailleurs, *I-SEND* nécessite 45.5 min pour satisfaire 60% des intérêts des utilisateurs alors que *Highest-degree* et *Enhanced-Highest degree* nécessitent 49.5 min et 58.4 min, respectivement.

Les résultats montrent l'insuffisance du critère de centralité pour désigner les nœuds relais dans le contexte d'applications de divertissement dans un réseau fortement mobile. En effet, d'autres paramètres ont un impact important sur la dissémination et par conséquent sur la sélection des *forwarders* tels que les durées de contacts, les préférences hétérogènes des utilisateurs et les contenus transportés

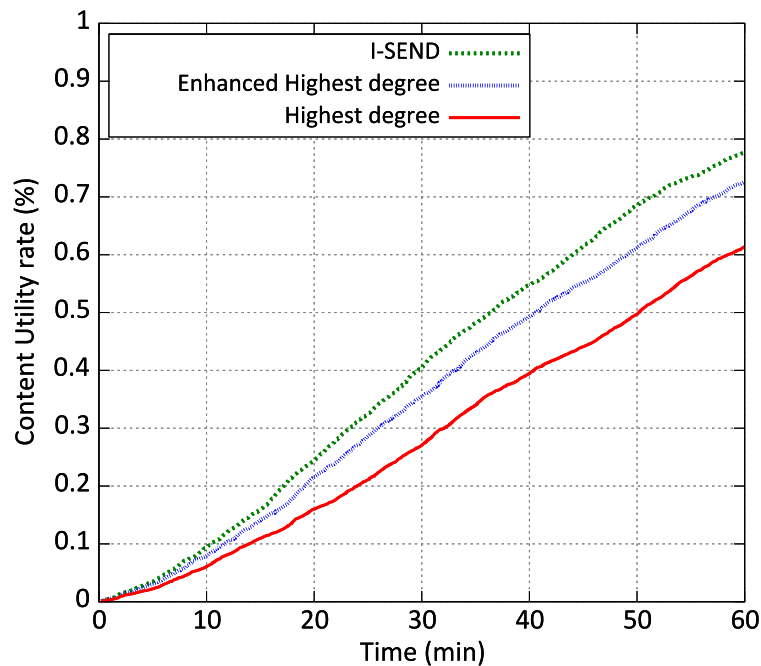


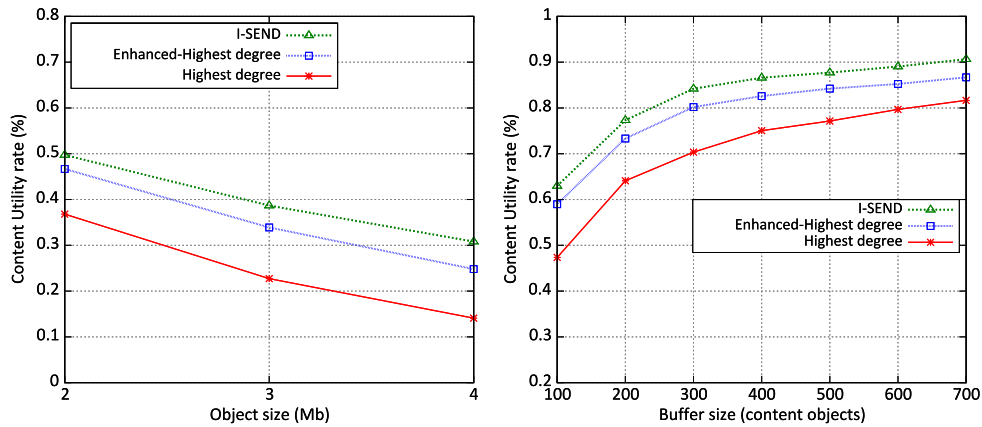
FIGURE 4.4 – Traces réelles : Taux d'utilité produit en fonction du temps

par les nœuds. Nous avons montré que lorsqu'on choisit des nœuds capables de produire plus d'utilité comme *forwarders*, même avec de faibles degrés de centralité, nous améliorons la satisfaction des intérêts des nœuds. Par conséquent, pour répondre aux intérêts des usagers routiers, les nœuds relais seront d'autant plus importants lorsqu'ils possèdent des objets intéressants pour les nœuds rencontrés et qu'ils auront des durées de contacts importantes permettant de disséminer un maximum d'objets.

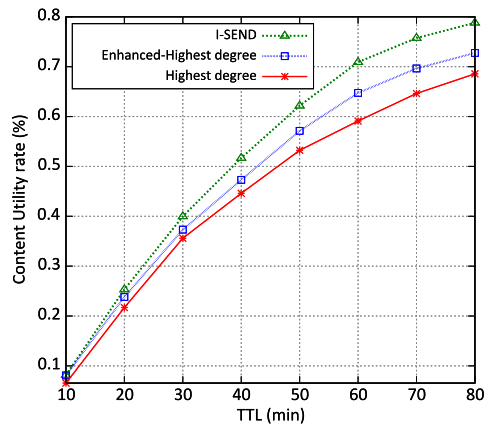
Dans la suite, nous comparons les performances d'I-SEND par rapport à *Highest-degree* et *Enhanced-Highest degree* dans différents environnements. La figure 4.5 montre l'impact des paramètres de simulations suivants : (i) taille des objets, (ii) durée de vie des objets et (iii) capacité de stockage des nœuds.

Les figures 4.5a et 4.5b montrent l'avantage d'I-SEND par rapport à *Highest-degree* et *Enhanced-Highest degree* pour différentes valeurs de la taille des objets et de la capacité de stockage. L'augmentation de la taille des objets couplée avec des capacités de stockage limitées rend la dissémination plus contraignante. En effet, cela diminue le volume de contenu qui peut être échangé et aussi limite

le nombre d'objets qu'un nœud peut transporter dans sa mémoire. Par conséquent, il serait encore plus important de faire la dissémination et le relayage en tenant au maximum compte des intérêts des usagers routiers en raison du nombre limité de contenus qui vont être reçus.



(a) Influence de la taille des objets; TTL=60 min, capacité de stockage=100 objets
 (b) Influence de la capacité de stockage; TTL=60 min



(c) Influence du TTL; capacité de stockage=150 objets

FIGURE 4.5 – Taux d'utilité produit en fonction de la taille des objets, de la capacité de stockage et du TTL

La figure 4.5c montre l'amélioration de I-SEND en fonction du TTL. Pour de faibles valeurs de

TTL combinées à la limitation de la capacité de stockage, le gain réalisé par **I-SEND** est faible puisque les objets expirent rapidement ce qui rend difficile la propagation des objets aux nœuds intéressés. Avec l'augmentation du TTL, la figure montre que **I-SEND** s'avère plus performant que les autres méthodes et permet de mieux satisfaire les intérêts des nœuds.

5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé un nouvel algorithme de sélection de *forwarder*, nommé **I-SEND**, fondé sur l'utilité. Cette dernière est calculée en fonction des intérêts des usagers routiers, des durées de contacts et des objets transportés par les nœuds. Ainsi, lorsque les nœuds entrent en communication, les contenus seront relayés par les nœuds permettant de produire les données les plus intéressantes pour leurs voisins, ce qui, par conséquent, augmente l'utilité totale produite dans le réseau. Les résultats de simulation ont montré qu'**I-SEND** s'avère plus performant que d'autres algorithmes fondés sur la centralité des nœuds et se concentre mieux sur les intérêts des utilisateurs.

Dans un environnement caractérisé par la présence de plusieurs contenus, des préférences hétérogènes des utilisateurs et une forte mobilité, il est plus important de considérer l'utilité pour choisir les *forwarders* que de considérer les nœuds avec des rôles vitaux pour le relayage des contenus.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéressons à la validation fonctionnelle de **I-PICK** et **I-SEND** dans le cadre d'une expérimentation réelle. Pour cela nous avons implanté nos approches en utilisant la plateforme IBR-DTN conçue pour les applications **DTN**.

CHAPITRE 5

Étude et analyse d'expérimentations de I-PICK et I-SEND

Sommaire

1	Matériels et outils utilisés	77
1.1	Équipements utilisés	78
1.2	Implantation du DTN Bundle Protocol	81
2	Implantation et validation du fonctionnement de I-PICK et I-SEND . .	82
2.1	Modification de l'échange des messages de beacon	82
2.2	Expression des préférences	83
2.3	Synchronisation entre les nœuds voisins	85
2.4	Implantation	86
2.5	Scénario retenu	87
3	Discussion	91
4	Conclusion	93

Dans les chapitres précédents, nous avons proposé et évalué par simulation deux solutions qui répondent au besoin d'amélioration de la dissémination de contenus pour garantir la satisfaction des usagers routiers. Nous avons mis en évidence les gains en performance que l'on pouvait obtenir si l'on tenait compte des intérêts des utilisateurs dans le processus de dissémination. Après cette première phase d'évaluation, nous allons nous intéresser à l'implantation que nous avons menée dans un environnement réel d'I-PICK et I-SEND. L'objectif de cette implantation est de valider la faisabilité et le bon fonctionnement du protocole de dissémination proposé.

1 Matériels et outils utilisés

Pour planter nos solutions, deux éléments principaux seront nécessaires :

- d'équipements qui seront utilisés par les utilisateurs pour communiquer avec les autres équipements d'une manière opportuniste.
- d'une implantation du DTN Bundle Protocol qui sera installée dans les différents équipements permettant la découverte de voisinage et l'échange de contenus.

1.1 Équipements utilisés

Il nous était difficile d'utiliser des véhicules équipés d'OBUs ou des modules WiFi [TeSL⁺14] conformes au standard IEEE 802.11p/DSRC. Pour cela, il nous est donc nécessaire de choisir d'autres équipements qui peuvent les remplacer, ces derniers peuvent être moins performants sur certains paramètres. Parmi les équipements qui peuvent être utilisés, nous pouvons citer les Raspberry Pi, des ordinateurs portables, des smartphones et des tablettes.

Le standard IEEE 802.11p offre plusieurs avantages qui sont assez importants pour les communications inter-véhicules. Il permet la communication et le maintien de la connexion avec un débit pratique entre 1 et 8 Mbit/s entre les véhicules qui se déplacent à grande vitesse [TeSL⁺14].

Le tableau 5.1 présente les caractéristiques des équipements cités ci-dessus. L'Obu se distingue principalement par le standard IEEE 802.11p par rapport aux autres équipements. Nous avons choisi d'utiliser des ordinateurs portables équipés du système d'exploitation Linux pour notre expérimentation en raison de leur puissance plus importante par rapport aux autres équipements cités et donc plus proche de celle d'Obu, de leurs disponibilité et du minimum de complexité pour l'implantation. La figure 5.1 illustre notre environnement de travail qui comporte trois machines dont chacune est équipée d'une interface réseau sans fil IEEE 802.11a/b/g/n. Pour communiquer, les machines utilisent un réseau ad-hoc. Le débit de transmission entre les machines est défini à 3 Mbit/s.

Le tableau 5.2 présente les caractéristiques des ordinateurs portables utilisés.

Il est évident que le recours à des ordinateurs portables avec le standard IEEE 802.11a/b/g/n n'est pas compatible avec le contexte véhiculaire. À titre d'exemple, avec ce standard, le temps de mise en place des communications peut durer quelques secondes ce qui n'est pas raisonnable dans des réseaux véhiculaires où les rencontres entre les véhicules ne durent que quelques secondes. De plus, avec le standard IEEE 802.11a/b/g/n, les communications risquent de ne pas être stables ou

TABLE 5.1 – Caractéristiques des équipements mobiles

	processeur	Communication sans fil	système	capacité de stockage	récepteur GPS
OBU	très puissant	IEEE 802.11p	Linux	grande	oui
ordinateur portable	très puissant	Standard IEEE 802.11a/b/g/n	Linux, Windows	Très Grande (supérieure à 500 Go)	pas de GPS mais peut utiliser un GPS USB
Raspberry Pi	puissant	ne contient pas la Wi-Fi. Nécessite un Dongle WiFi USB qui permette les communications sans fil.	Linux	pas de stockage interne. Utilise une carte MicroSD de 8Go à 64Go	pas de GPS mais peut utiliser un GPS USB
Smartphone	moyennement puissant	Standard IEEE 802.11a/b/g/n	Android, iOS, Windows	Entre 8Go et 32Go	oui
Tablette	moyennement puissant	Standard IEEE 802.11a/b/g/n	Android, iOS, Windows	Entre 8Go et 32Go	oui

interrompues lorsque les nœuds se déplacent avec des vitesses très élevées (e.g. 130 km/h).

Par conséquent, dans cette expérimentation, la mobilité des nœuds ne sera pas exploitée pour deux raisons. D'une part, il nous est difficile de faire une expérimentation avec de vraies voitures ou avec des dispositifs mobiles pour plusieurs raisons telles que la nécessité d'une grande zone de test. D'autre part, les équipements que nous utilisons ne sont pas certifiés IEEE 802.11p. Dans notre banc de tests, la mobilité sera émulée et caractérisée en termes de durées de contacts.

En revanche, cette expérimentation appréhendera mieux ce qui va se passer sur les couches plus basses que l'environnement de simulation proposé **THE ONE** qui s'intéresse pratiquement uniquement aux protocoles de niveau assez élevé. De plus, nous allons étudier et analyser, à travers cette



FIGURE 5.1 – Trois machines Linux utilisées pour l'expérimentation

TABLE 5.2 – Caractéristiques des machines

	dtn ://FAROUK	dtn ://ROGER	dtn ://IOANA
Mémoire vive	4 Go	2 Go	4 Go
Processeur	Intel Core i3 380M (2533 MHz)	Interl Core i3	Intel Core i5
WiFi	802.11b/g/n	802.11b/g/n	802.11b/g/n
Système d'exploitation	Linux / Ubuntu 12.04	Linux / Ubuntu 14.04	Linux / Ubuntu 14.04

expérimentation, des enjeux qui ont forcément un impact sur nos solutions et sur la dissémination de contenus. Ces enjeux concernent l'hétérogénéité des machines utilisées ainsi que le paramétrage des temporisations. En effet, les machines possèdent des caractéristiques différentes ce qui peut être le cas pour les **OBU** dans un cas réel de réseaux véhiculaires. Cette hétérogénéité peut avoir un impact sur le fonctionnement de nos solutions. En outre, nous avons proposé d'utiliser les temporisations pour la sélection du *forwarder*. Cette proposition ne présente pas de difficulté de réalisation dans les simulations. A contrario, elle peut engendrer des difficultés dans un cas réel, un mauvais choix de temporisation entre les nœuds peut causer une collision lors de la dissémination.

Il est évident que d'autres enjeux existent dans l'environnement véhiculaire qui est connu pour être particulièrement contraignant. Nous nous limitons à l'étude des enjeux cités ci-dessus et à la fin de ce chapitre nous détaillons d'autres problématiques liées à l'expérimentation de la dissémination

de contenus dans un contexte des réseaux véhiculaires qui resteront ouvertes et pourront être étudiées dans des travaux futurs.

1.2 Implantation du DTN Bundle Protocol

Après avoir choisi les machines que nous allons utiliser, nous entamons l'étape suivante qui consiste à implanter le DTN Bundle Protocol sur les différentes machines. Pour cela, nous examinons tout d'abord les trois implantations du DTN Bundle Protocol avec un code source ouvert (*open source*) et qui sont les suivantes : (i) [Interplanetary Overlay Network \(ION\)](#), (ii) DTN2 et (iii) IBR-DTN.

(i) **ION** : la première implantation du DTN Bundle protocol que nous présentons est [ION](#) [Bur07].

Cette implantation a été développée par le [Jet Propulsion Laboratory \(JPL\)](#) avec pour objectif d'être déployée dans un contexte de communications interplanétaires.

(ii) **DTN2** : est l'implantation de référence du DTN Bundle Protocol par le [Delay-Tolerant Networking Research Group \(DTNRG\)](#) [MDP03]. Il fournit un framework flexible pour les expérimentations DTN et peut être configuré et géré par des fichiers de console et de configuration TCL. Le langage de programmation utilisé dans le noyau de DTN2 est le C++.

(iii) **IBR-DTN** : IBR-DTN est une implantation destinée aux systèmes embarqués ainsi qu'aux systèmes Linux standard [DLMW08, SMPW11]. Il est codé en C++. IBR-DTN est conçu pour les applications des réseaux DTNs où la sémantique de bout-en-bout des protocoles tels qu'IP est remplacée par la technique du « *store, carry and forward* ».

Une comparaison de ces implantations sous différents angles a été effectuée dans les travaux [PMSW11a, PMSW11b, JWWH12]. À partir de cette comparaison, nous essayons de déterminer l'implantation la mieux adaptée pour un environnement véhiculaire.

Nous avons commencé par écarter l'implantation [ION](#) des propositions puisqu'elle ne permet pas les contacts opportunistes [PMSW11b]. En effet, [ION](#) est strictement focalisée sur des contacts réguliers et ne possède pas de mécanisme de découverte. IBR-DTN et DTN2 permettent la découverte de voisinage, et par ailleurs, les nœuds mobiles transportent des messages (*bundles*) et les transmettent à d'autres nœuds qu'ils pourraient rencontrer d'une manière opportuniste. En revanche, plusieurs scénarios ont été envisagés dans [PMSW11a] pour évaluer le comportement des implantations. Les

résultats ont montré que IBR-DTN s'avère plus performant que DTN2 et ION. De plus, IBR-DTN offre plusieurs versions pour les différents systèmes d'exploitation (Linux, Android, Windows, MacOS, Debian) et un tutoriel d'installation et d'utilisation très utile et qui n'existe pas pour DTN2. Par conséquent, nous avons choisi la plateforme IBR-DTN et nous l'avons donc installée sur les différentes machines [IBR]. La figure 5.2 présente une vue d'ensemble de l'architecture de IBR-DTN [SMPW11].

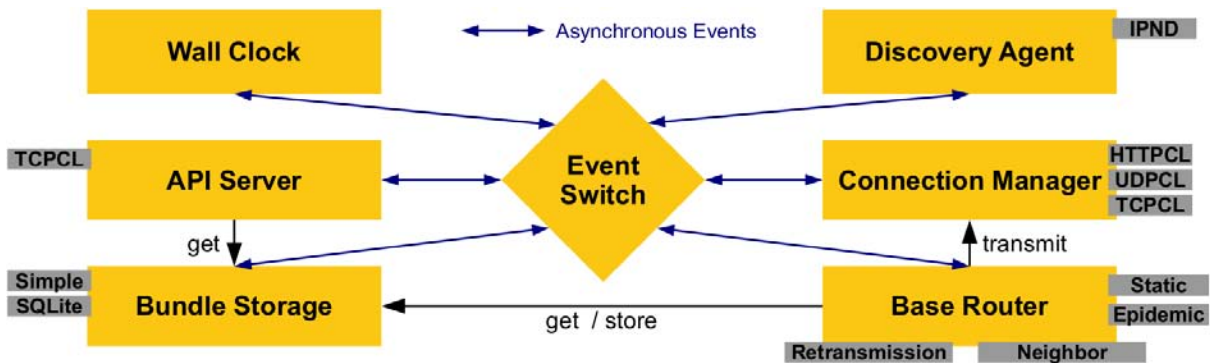


FIGURE 5.2 – Architecture de IBR-DTN

2 Implantation et validation du fonctionnement de I-PICK et I-SEND

Dans ce qui suit, nous détaillons les différentes modifications que nous avons effectuées sur IBR-DTN, l'implantation de I-PICK et I-SEND, et le scénario retenu.

2.1 Modification de l'échange des messages de beacon

Tout d'abord, nous avons commencé par modifier la période d'échange des messages de *beacon* de 1 s (période par défaut) à 4 s. Il a fallu simplement modifier le paramètre qui définit cette période dans une classe qui réalise l'envoi périodique des messages de *beacon*.

Ensuite, nous avons modifié le contenu du message de *beacon* en ajoutant les informations de préférences de l'utilisateur et la mobilité du nœud qui nous seront utiles pour l'implantation de I-PICK et I-SEND. L'ancien message de beacon était sous la forme suivante : $\langle id, port \rangle$. Nous avons

défini des paramètres supplémentaires associés à la mobilité et les préférences du nœud. Le nouveau message de *beacon* est devenu : $\langle id, port, x, y, dir, speed, preferences \rangle$. Le champ *port* caractérise le numéro de port utilisé pour l'échange de contenus avec les voisins.

Dans un environnement réel, un véhicule tire les informations de position, vitesse et direction du système [GPS](#). Puisque notre environnement ne présente pas de mobilité des nœuds, nous avons choisi de définir un exemple de communication simple entre les trois machines utilisées avec la mise en place de valeurs de mouvement choisies de manière à vérifier le fonctionnement de [I-PICK](#) et [I-SEND](#) (ces valeurs seront présentées dans la suite).

La taille d'un message de *beacon* est de 100 octets. Ces messages doivent être de petite taille afin de ne pas surcharger le réseau et pour être rapidement transmis entre les nœuds et par conséquent optimiser les temps de communication.

Chaque nœud reçoit périodiquement les messages de *beacon* de ses voisins. Le nœud extrait alors des messages de *beacon* les préférences et les informations de mobilité de chaque nœud voisin. Ces dernières sont ensuite utilisées pour l'implantation de [I-PICK](#) et [I-SEND](#).

2.2 Expression des préférences

Nous considérons une application qui offre des services variés aux usagers routiers tels que des informations commerciales, des annonces publicitaires ou des informations sur des événements locaux. Ces différents services sont associés à différentes thématiques. Dans un environnement réel, l'utilisateur attribue des intérêts à différentes thématiques proposées comme dans l'exemple illustré dans la figure [5.3](#). Dans ce travail, nous avons choisi un exemple avec six thématiques prédéfinies pour lesquelles chaque utilisateur exprime ses intérêts comme montré dans l'exemple de la figure [5.4](#).

L'utilisateur exprime par un entier $\in [0, 9]$ son intérêt pour chaque thématique. Dans notre environnement, le plus important derrière le choix de ces valeurs est de pouvoir exprimer des intérêts hétérogènes vis-à-vis de thématiques prédéfinies. En revanche, le nombre de thématiques, leurs degré de finesse et la notation attribuée aura un impact sur la taille des messages échangés. On se devra bien évidemment d'en étudier l'impact voire de les optimiser. À titre d'exemple, si les intérêts seront

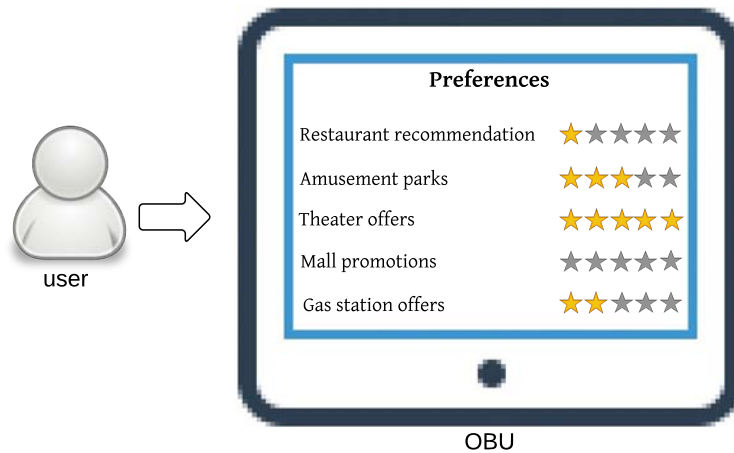


FIGURE 5.3 – Expression des intérêts pour les différentes thématiques

exprimés par des entiers $\in [0, 3]$, cela garde l'hétérogénéité des préférences et permettra d'alléger la taille des préférences occupée dans le *beacon*.

Globalement, ces valeurs d'intérêt doivent être choisies de façon à exprimer différents niveaux de préférence tels que : non intéressé, peu intéressé, moyennement intéressé et très intéressé. Ces préférences sont alors enregistrées dans le paramètre *preferences* contenu dans le message de *beacon*. Elles peuvent fluctuer et donc être modifiées au cours du temps par le même utilisateur ou lorsqu'un nouvel utilisateur utilise l'équipement OBU. Pour cela, l'utilisateur devra sélectionner l'identifiant de la thématique, saisir et sauvegarder la nouvelle valeur de l'intérêt. Pour chaque échange périodique des messages de *beacon*, chaque nœud a la connaissance de ses voisins et extrait les informations de préférences et de mobilité de chaque nœud voisin à partir des messages de *beacon*.

Nous n'allons pas décrire ici tous les détails d'implantation liés aux différentes étapes dans cette expérimentation pour l'expression de ces préférences. On peut néanmoins encore citer l'exemple d'un ensemble des thématiques prédéfinies très grand. La question qui se pose alors est la suivante, un utilisateur doit-il reconfigurer ses préférences à chaque utilisation lorsque un véhicule (OBU) est partagé par plusieurs personnes? Dans ce cas, il sera envisageable de créer des profils pour chaque utilisateur permettant d'enregistrer les intérêts de chacun. Cela permet donc d'éviter la reconfiguration systématique. Il sera néanmoins toujours possible de modifier ses propres intérêts.

beacon. Cette configuration ajoutée dans notre environnement pour les nœuds maîtres et esclaves ne sera pas nécessaire dans les réseaux véhiculaires. En effet, comme montré dans [Mor10], une expérimentation a été faite et a approuvé que les OBU des véhicules peuvent se synchroniser en utilisant les GPS avec une erreur temporelle inférieure à 100 nanosecondes.

2.4 Implantation

L'implantation d'I-PICK et I-SEND a été faite en langage C pour avoir des temps d'exécution rapides. Ce sont les solutions détaillées dans les chapitres 3 et 4 en utilisant des scripts en langage C qui ont été implantées. L'échange de contenus entre les nœuds doit être établi uniquement quand une ou des communications apparaissent. Par conséquent, le script est exécuté lorsque une communication opportuniste apparaît entre les nœuds. Ce script permet de réaliser les tâches suivantes :

- Vérifier la liste des objets que le nœud possède dans sa mémoire. Tous les contenus qu'un utilisateur possède seront stockés dans un même répertoire associé à l'application utilisée.
- Extraire les préférences et les informations de mobilité des voisins à partir des messages de *beacon* reçus.
- Estimer les durées de contacts avec les voisins. Pour cette étape, nous utilisons des valeurs prédéfinies puisque les machines utilisées sont fixes et ne possèdent pas de récepteur GPS.
- Ordonnancer les objets en utilisant l'algorithme détaillé dans la solution I-PICK
- Calculer l'utilité que le nœud peut produire
- Calculer et déclencher le temporisateur. Chaque nœud calcule son temporisateur comme suit :

$$\text{Timer}_{\text{dtn_node}} = \alpha / \text{utilité}$$

Par conséquent, le nœud ayant l'utilité la plus élevée aura le temporisateur le plus court. Le choix de la valeur du paramètre α sera détaillé dans la suite.

- Envoi ou réception des contenus. Dès que le temporisateur expire, le nœud vérifie s'il est en train de recevoir des contenus des voisins. Dans ce cas, ce nœud annule sa transmission et continue à recevoir des objets de voisins. Si le nœud est choisi comme *forwarder*, il commence à disséminer ses objets.

TABLE 5.3 – préférences des voisins de dtn ://FAROUK

	o_1	o_2	o_3
dtn ://IOANA	2	1	7
dtn ://ROGER	4	6	8

TABLE 5.4 – préférences des voisins de dtn ://ROGER

	o_4	o_5
dtn ://FAROUK	1	2
dtn ://IOANA	2	6

TABLE 5.5 – préférences des voisins de dtn ://IOANA

	o_6
dtn ://FAROUK	4
dtn ://ROGER	1

2.5 Scénario retenu

Nous allons illustrer l'ensemble du fonctionnement sur un exemple de scénario très simple. Nous considérons trois nœuds dont chacun dispose d'un ensemble d'objets. Chaque objet est associé à une thématique spécifique. Pour simplifier et sans perte de généralité, dans notre scénario nous supposons que les différents objets existant dans le réseau sont associés à des thématiques différentes. De plus, les objets sont de même taille égale à 600 KB. Les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5 présentent les différents objets possédés par chaque machine ainsi que les préférences des voisins.

Nous utilisons une machine pour créer un réseau ad-hoc et les autres machines se connectent au même réseau. Ensuite, à un instant t_0 , nous exécutons le *daemon* de IBR-DTN sur les différentes machines en utilisant une interface WiFi et le fichier de configuration. L'interface sans fil sera utilisée pour les communications entre les nœuds et le fichier de configuration permet de définir plusieurs paramètres tels que l'identifiant du nœud et la technique de diffusion qui est le *broadcast* dans notre cas.

La figure 5.5 montre le scénario considéré avec un exemple réel de voiture. La figure 5.6 illustre le scénario équivalent en utilisant les machines. Les durées de communications entre les différents nœuds sont définies en fonction de Δt comme illustré dans les figures. Δt est la durée de temps nécessaire pour disséminer un objet.

Le scénario considéré est illustré sur deux laps de temps de 4 s qui sont $[t_0, t_0 + 4s]$ et $[t_0 + 4s, t_0 + 8s]$. L'instant t_0 correspond au premier échange de message de beacon entre les nœuds et par conséquent la première exécution de I-SEND. Ensuite, l'instant $t_0 + 4s$ correspond au deuxième échange et exécution de I-SEND.

A l'instant t_0 , chaque machine reçoit les messages de *beacon* de ses voisins, et exécute alors le

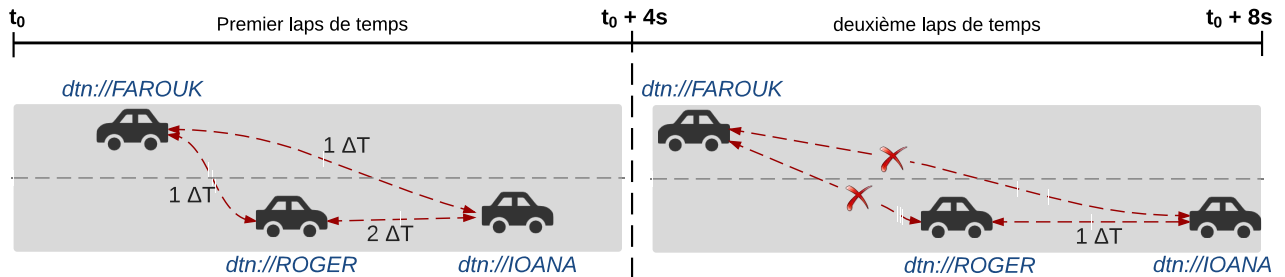


FIGURE 5.5 – scénario réel avec des véhicules

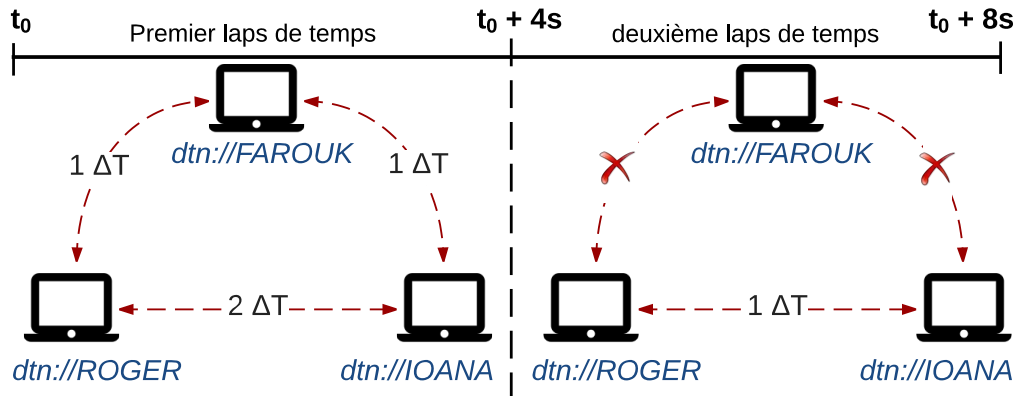


FIGURE 5.6 – scénario retenu avec des machines

script de dissémination de contenus. Le temps d'exécution du script pour les différentes machines est présenté dans le tableau 5.6. Les différences observées entre les différentes machines sont influencées principalement par les deux points suivants :

- Caractéristiques de l'équipement : des machines peuvent être plus puissantes que d'autres et par conséquent cela leur permet d'exécuter un même processus plus rapidement.
- Calcul de l'utilité : plus le nœud possède de voisins et de messages, plus ce temps de calcul de l'utilité sera long.

Avec le débit de transmission entre les machines, un *forwarder* peut envoyer un seul objet pendant un laps de temps Δt . Nous avons implanté le protocole de dissémination de sorte qu'un nœud ne retransmette pas les mêmes objets sur plusieurs laps de temps lors d'une même communication. À

TABLE 5.6 – Temps d'exécution du script sur les différentes machines

	Temps d'exécution du script
dtn ://FAROUK	10 ms
dtn ://IOANA	8 ms
dtn ://ROGER	12 ms

titre d'exemple, si v_1 entre en contact avec v_2 et lui envoie l'objet o_1 pendant un premier laps de temps, v_1 ne tiendra plus compte de l'intérêt de v_2 pour o_1 dans les laps de temps suivants. En effet, des solutions seront nécessaires à mettre en place pour éviter les doublons et pour permettre le choix du *forwarder* le plus utile. Dans notre scénario, il nous a fallu considérer cette hypothèse pour éviter le risque de choisir systématiquement le même *forwarder* qui envoie les mêmes objets.

Dans un cas réel, il est possible de proposer des solutions afin de minimiser les doublons. On pourra garder l'historique des communications sur un passé proche pour de minimiser les doublons surtout dans les communications qui s'interrompent et se rétablissent sur des périodes très courtes.

Choix du paramètre α des temporisations

Afin de choisir la valeur du paramètre α nécessaire pour le calcul des temporisations, nous avons déroulé un scénario simple en faisant varier la valeur de α . Nous avons remarqué que, lorsque la différence entre les temporisateurs du nœud désigné comme *forwarder* et ceux des voisins est inférieure à 10 ms, cela induit un envoi simultané des nœuds. À titre d'exemple, nous avons défini le paramètre α égal à 0.1 ce qui a donné les valeurs de temporisations suivantes :

$$\text{Temporisateur (dtn ://FAROUK)} = 0.1/15 = 6.6ms$$

$$\text{Temporisateur (dtn ://IOANA)} = 0.1/4 = 20ms$$

$$\text{Temporisateur (dtn ://ROGER)} = 0.1/11 = 9ms$$

Dans ce cas, le nœud dtn ://FAROUK est désigné comme *forwarder* puisqu'il possède le temporisateur le plus faible. Étant donné que la différence entre le temporisateur de dtn ://FAROUK et celui de dtn ://ROGER est très petite (égale à 2.4 ms), cela n'est pas suffisant pour permettre au voisin

dtm ://ROGER de connaître le *forwarder* désigné. En effet, l'expiration de son temporisateur, le nœud dtm ://ROGER ne détecte pas encore la diffusion de dtm ://FAROUK. Par suite, ces deux nœuds envoient leurs objets qui résultent en collision et en débordement de la période $Time_B$.

Avec ce scénario et différentes valeurs de temporisation (en faisant varier α), nous avons déterminé que dans notre environnement, la différence entre les temporisations (du *forwarder* et des voisins) doit être supérieure à 10 ms pour qu'un seul *forwarder* soit choisi. Dans la suite, nous choisissons une valeur de α égale à 1 ce qui permet dans ce cas d'avoir des temporisations permettant de sélectionner un seul *forwarder* parmi les voisins.

Bien que ce choix nous ait permis de sélectionner le *forwarder*, il reste non optimal. En effet, les temporisations dépendent du paramètre α mais aussi des utilités calculées qui varient en fonction du temps. Comme on l'a également constaté, les temps de calcul vont varier d'une machine à l'autre en fonction de ses voisins, des objets qu'elle possède et de sa puissance de calcul. Pour cela, une étude approfondie doit être effectuée pour aboutir à un calcul efficace des temporisations afin qu'elles soient faibles sans pour autant provoquer d'envois simultanés entre voisins.

Premier laps de temps

A l'instant t_0 , les différentes machines calculent les utilités qu'elles peuvent produire pendant le premier laps de temps.

- dtm ://FAROUK est en communication avec ses voisins pour une durée permettant d'envoyer un seul objet. Il peut envoyer l'objet o_3 qui est le plus intéressant pour ses voisins et peut donc produire une utilité égale à 15 (7+8).
- dtm ://IOANA peut envoyer son unique objet o_6 et donc peut produire une utilité égale à 5 (1+4).
- dtm ://ROGER peut envoyer ses deux objets o_4 et o_5 pour produire une utilité égale à 11 ((1+2)+(2+6)).

Par conséquent, les temporisateurs des différents nœuds sont comme suit :

Temporisateur (dtm ://FAROUK) = $1/15 = 66ms$

Temporisateur (dtn ://IOANA) = $1/4 = 200ms$

Temporisateur (dtn ://ROGER) = $1/11 = 90ms$

À l'expiration des temporisateurs, dtn ://FAROUK diffuse l'objet o_3 à ses voisins. dtn ://ROGER et dtn ://IOANA annulent leurs transmissions puisqu'ils sont en train de recevoir des contenus, ce qui est vérifié par l'écoute du port utilisé pour la dissémination.

Deuxième laps de temps

Lors du deuxième laps de temps, la communication entre dtn ://FAROUK et les autres nœuds s'est interrompue. dtn ://ROGER et dtn ://IOANA sont encore en contact et échangent les messages de *beacon* à l'instant $t_0 + 4s$. Par conséquent, chacun de ces nœuds calcule l'utilité qu'il peut apporter à ses voisins comme suit :

- dtn ://IOANA peut envoyer son unique objet o_6 et donc peut produire une utilité égale à 1.
- dtn ://ROGER peut envoyer l'objet o_5 pour produire une utilité égale à 6.

Par conséquent, dtn ://IOANA déclenche un temporisateur de 1 s (1/1) et dtn ://ROGER déclenche un temporisateur de 166 ms (1/6). Ensuite, à l'expiration du temporisateur, dtn ://ROGER envoie l'objet o_5 et dtn ://IOANA annule sa transmission.

3 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons montré le fonctionnement de nos solutions dans un environnement limité avec un réseau comportant trois machines. L'expérimentation réalisée nous a permis d'identifier quelques problématiques et difficultés. De plus, en raison de la limite de l'environnement utilisé, certains enjeux n'ont pas été étudiés, nous allons les détailler maintenant.

Tous d'abord, nous commençons par décrire les difficultés et les pistes qui seront ouvertes pouvant potentiellement améliorer notre expérimentation et nos solutions.

- **Hétérogénéité des équipements** : nous avons observé que le temps d'exécution du script permettant de sélectionner le *forwarder* dépend des caractéristiques de la machine utilisée. Cela n'a pas un grand impact quand la différence entre ces temps d'exécutions est très faible.

Au contraire, si cette différence est grande, ceci peut affecter la sélection du *forwarder* et par conséquent la dissémination. En effet, avec cette hétérogénéité, il est possible qu'un *forwarder* soit choisi même s'il n'est pas le plus utile parmi ses voisins. Par conséquent, il sera important d'étudier ce point en considérant différents **OBU**s et de mettre en œuvre plusieurs scénarios afin de voir l'impact de ce temps d'exécution.

- **Calcul du temporisateur** : la somme du temporisateur (calculé en fonction de l'utilité) et du temps d'exécution du script de sélection de *forwarder*, représente le temps total d'attente avant la dissémination. Cette somme ne doit pas être grande puisque la période de communication entre les nœuds risque d'être très courte. Optimiser le calcul de cette somme est un défi pour deux raisons. D'une part, il est difficile de borner la valeur du temporisateur puisque l'utilité calculée dépend du nombre de voisins et de leurs préférences, ainsi que de la taille des objets. Ce temporisateur ne doit pas être grand pour ne pas perdre du temps de communication comme il ne doit pas être trop petit pour éviter la collision. D'autre part, le temps d'exécution du script de sélection de *forwarder* doit être minimal en optimisant le code et en utilisant un équipement puissant.
- **Calcul de l'utilité** : le calcul d'utilité dépend des paramètres de mobilité des voisins et des débits de transmissions entre ces derniers. Les signaux se dégradent avec la distance et avec les obstacles, limitant ainsi la portée et le débit de la liaison à distance entre les nœuds mobiles. Par conséquent, déterminer le nombre d'objets qu'un nœud peut envoyer à ses voisins pendant un laps de temps doit être faite en essayant d'avoir une erreur faible.
- **Mobilité des nœuds** : les expérimentations doivent être répétées dans un environnement mobile en utilisant par exemple des autos.
- **Un grand nombre de nœuds** : il est nécessaire de montrer que nos solutions passent à l'échelle. C'est évidemment un des points les plus difficiles à vérifier en environnement réel.
- **Période d'échange de beacon** : nous avons défini la période d'échange des messages de *beacon* afin de permettre la découverte de voisinage quand les véhicules se rencontrent sans surcharger le réseau. En effet, une période très petite risque d'engendrer un problème d'*overhead* dans le réseau. Une valeur très grande risque de ne pas permettre aux véhicules très rapides de

s'entendre lorsqu'ils se rencontrent. Pour cela, il est important d'étudier la charge causée par l'échange de *beacon* en faisant varier la période d'échange et voire l'optimiser.

4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi une validation fonctionnelle de **I-PICK** et **I-SEND** dans un environnement réduit. Nous avons déroulé dans le présent chapitre un scénario en utilisant trois machines *Linux* dont chacune possède différents objets et des préférences vis-à-vis de thématiques prédéfinies. Lors de la communication entre les machines, la sélection de *forwarder* est effectuée périodiquement en utilisant les temporisateurs déterminés à partir des utilités calculées pour chaque nœud. Nous avons finalement ouvert différentes pistes pouvant potentiellement être explorées afin de produire un démonstrateur complet de nos solutions.

CHAPITRE 6

Exploiter les communications V2V pour réduire le trafic cellulaire

Sommaire

1	Augmentation du trafic cellulaire ... <i>Offloading</i> via les communications opportunistes est une solution prometteuse	95
2	État de l'art des méthodes de sélection des sources initiales	98
3	Système considéré et problématique	100
4	Prédiction des futurs contacts dans les réseaux véhiculaires	101
5	SDN-SIEVE	103
5.1	Système considéré	103
5.2	Description de SDN-SIEVE	105
5.2.1	Collecte des informations des véhicules	106
5.2.2	Prédiction des futurs contacts	106
5.2.3	Estimation de l'utilité qu'un nœud peut produire et choix des sources	107
5.2.4	Téléchargement et dissémination de l'objet	108
5.3	Algorithme de SDN-SIEVE	108
5.4	Discussion	109
6	Évaluation des performances	111
6.1	Méthodologie suivie	111
6.2	Résultats	112
7	Discussion	115
8	Conclusion	116

1 Augmentation du trafic cellulaire ... *Offloading* via les communications opportunistes est une solution prometteuse

Avec la prolifération des appareils mobiles, les réseaux véhiculaires ont connu le développement de plusieurs applications de divertissement gourmandes en données destinées aux usagers routiers (i.e. conducteurs, passagers) [WAZ, SHSI08, SKNI13, LLM10, TFB12, ZZS⁺11]. Ces applications offrent une commodité et un confort pour les utilisateurs en fournissant une multitude de services tels que des

contenus multimédias, des annonces publicitaires, le partage social de contenus,... [CSZ11, ZZS⁺11].

La plupart de ces applications permettent aux usagers routiers d'accéder à et de télécharger une grande quantité d'information à partir d'un serveur de contenus Internet au travers des réseaux cellulaires. Un effet secondaire de la prolifération et du succès de ces applications réside dans l'incapacité des réseaux cellulaires à résister à des augmentations brusques du trafic en raison des limites de l'infrastructure et de leur surcharge fréquente. En effet, le trafic de données a presque triplé sur ces trois dernières années, et il est prévu qu'il décuple entre 2014 et 2019 [CIS15]. Cette explosion que peut connaître le trafic des données mobiles risque d'entraîner une réduction de la performance et de la qualité de service perçues par les utilisateurs. Ce problème concerne en premier lieu les opérateurs de télécommunications qui doivent alors trouver des solutions pour réduire le trafic cellulaire.

Les circonstances mentionnées ci-dessus ont favorisé l'intérêt pour d'autres méthodes visant à réduire la pression sur le réseau cellulaire. Dans un premier temps, les opérateurs mobiles ont résolu cette éventuelle augmentation du trafic cellulaire par la limitation du débit de connexion et le plafonnement de l'utilisation des données [Cur13]. Cependant, une telle solution affecte négativement la satisfaction des utilisateurs. Pour cela, d'autres solutions présentes dans l'architecture des réseaux cellulaires doivent être explorées pour remédier à la croissance exponentielle de la demande du trafic des données mobiles. Parmi celles-ci, celle qui a probablement le plus attiré l'attention des chercheurs et des opérateurs consiste à utiliser une technologie sans fil complémentaire pour transférer des données du trafic cellulaire afin d'en améliorer le fonctionnement.

La figure 6.1 illustre les deux approches permettant de réduire le trafic cellulaire. Détourner le trafic à travers les points d'accès sans fil, comme montré dans la figure 6.1a, est une solution proposée pour réduire le trafic cellulaire [DHHL11]. Les utilisateurs situés dans la zone d'un hotspot, peuvent utiliser ce dernier au lieu des réseaux cellulaires. Généralement, les hotspots offrent un meilleur débit de communication que les réseaux cellulaires [Kor11]. Cependant, la couverture et la mobilité sont limitées au sein d'un point d'accès sans fil. Cette solution peut être déployée dans des endroits tels qu'un centre commercial ou un restaurant où les utilisateurs peuvent s'adapter à ces contraintes de mobilité et de couverture.

L'avancée des technologies sans fil et la prolifération des appareils mobiles ont rendu possible le

1 - Augmentation du trafic cellulaire ... *Offloading* via les communications opportunistes est une solution prometteuse

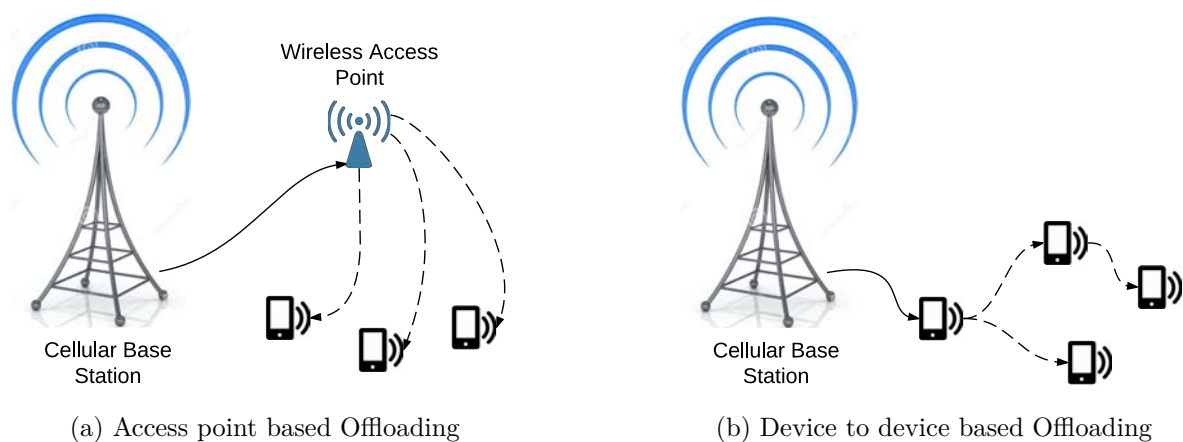


FIGURE 6.1 – Solutions utilisées pour l'*offloading* du réseau cellulaire

déploiement de réseaux qui s'appuient sur des communications directes inter-équipements mobiles sans avoir recours à une infrastructure. Cette approche innovatrice possède des caractéristiques intrinsèques qui peuvent être utilisées pour réduire le trafic cellulaire. En tirant profit d'intérêts communs partagés entre des utilisateurs situés à proximité, un fournisseur de service cellulaire peut décider d'envoyer des contenus à un ensemble limité d'utilisateurs qui se chargent à leur tour de transmettre les contenus aux autres utilisateurs en utilisant les communications mobile-à-mobile [HHK⁺10, HHK⁺12] (figure 6.1b).

Les réseaux véhiculaires constituent un environnement à grand échelle caractérisé par une forte mobilité des nœuds. Pour cela, la solution d'*offloading* en utilisant des points d'accès sans fil est une solution inappropriée en raison essentiellement de la trop faible durée de passage des véhicules auprès de ces points d'accès. En revanche, utiliser les communications opportunistes entre les véhicules pour réduire les réseaux cellulaires est une solution prometteuse. Néanmoins, cette solution présente plusieurs défis majeurs parmi lesquels la sélection des sources initiales, problème auquel nous nous intéressons dans ce chapitre.

Le délestage d'une partie du trafic des réseaux cellulaires grâce aux communications opportunistes entre les véhicules (i.e. V2V) a été étudié comme une solution prometteuse pour surmonter partiellement ce problème [MCCF12]. En effet, les véhicules peuvent utiliser les communications à

courte portée, tels que les technologies WiFi et [DSRC](#), pour le partage et la distribution de contenus. Ainsi, initialement, seul un ensemble limité de nœuds, appelés sources (i.e. *seeds*), sont choisis pour télécharger des objets à partir d'un serveur de contenus au travers du réseau cellulaire. Ensuite, chaque nœud source diffuse les objets à ses voisins, et les contenus peuvent alors être progressivement propagés partout dans le réseau. Par conséquent, cela évite une dépendance excessive vis-à-vis de l'utilisation des réseaux cellulaires et tire profit du réseau de communication [V2V](#) caractérisé par son faible coût, sa facilité de déploiement, et son débit de transmission potentiellement plus élevé que celui des réseaux cellulaires.

La sélection des nœuds sources, qui représente l'étape initiale de l'*offloading* des réseaux cellulaires, constitue un défi majeur [[CLZ⁺14](#)]. D'une part, la topologie du réseau véhiculaire est hautement dynamique en raison de la mobilité des véhicules, ce qui rend difficile de prévoir la topologie du réseau. D'autre part, un contenu peut être critique en termes de délai (i.e. obsolète ou beaucoup moins pertinent après une période de temps). Par conséquent, il devrait être délivré suffisamment rapidement aux utilisateurs intéressés avant l'expiration de sa durée de vie.

Dans ce chapitre, nous étudions le problème de sélection des sources initiales lors de l'*offloading* du trafic cellulaire à travers les communications [V2V](#). Pour cela, dans le paragraphe suivant, nous présentons les travaux les plus significatifs qui présentent des solutions pour la sélection des sources initiales dans le contexte des réseaux véhiculaires.

2 État de l'art des méthodes de sélection des sources initiales

Plusieurs travaux ont étudié le problème de la sélection des sources dans les réseaux véhiculaires [[SFM13](#), [YZH⁺15](#), [WZZ13](#), [KK14](#), [QZZ⁺14](#)] visant à améliorer deux points principaux : (i) réduire au maximum le trafic cellulaire et (ii) élargir la couverture de propagation des contenus.

Certaines approches ont porté sur la minimisation du nombre de nœuds sources, ce qui permet de réduire le coût en communications cellulaires, à condition que tous les utilisateurs puissent récupérer le contenu avant son expiration. D'autres approches ont abordé le choix des nœuds sources avec pour objectif de maximiser la couverture de propagation des contenus.

Parmi les premières approches proposées, une solution consiste à choisir comme sources les nœuds les plus influents dans le réseau (i.e. ceux qui sont situés au cœur du réseau) par exemple ceux ayant le plus de voisins afin d'assurer une propagation efficace des contenus [KGH⁺10]. Cette approche peut être efficace dans un environnement de réseau statique, mais pas vraiment dans un réseau très dynamique car cette influence peut varier selon l'état du réseau.

Afin de surmonter cette contrainte de dynamisme du réseau, des solutions ont été proposées ; elles reposent sur une connaissance *a priori* de l'état futur du réseau. À titre d'exemple, [QZZ⁺14] propose une méthode de sélection de sources qui considère les historiques de contacts afin de prévoir les futures communications entre les véhicules. On choisit donc comme sources les nœuds ayant des degrés de centralité importants compte tenu de l'état courant et de l'évolution future estimée du réseau.

Toutefois, si l'on considère différentes communautés qui peuvent exister au sein d'un réseau, (i.e. ensemble de nœuds qui forment des communautés sur des intérêts ou des zones communes) cette approche peut ignorer certaines communautés. En effet, cette solution peut choisir les nœuds ayant les plus grands degrés de centralité comme sources mais appartenant aux mêmes communautés. C'est pour cela qu'une solution fondée sur les communautés a été proposée. Elle consiste à choisir les nœuds sources ayant les degrés de centralité les plus élevés et appartenant à différentes communautés [CL12].

Ces travaux ont conduit à de bons résultats en termes de réduction du trafic cellulaire et de couverture de propagation des contenus. Cependant, ces approches pourraient être enrichies en prenant en compte les préférences des utilisateurs. En effet, les travaux cités considèrent un seul type de contenus qui sont traités comme une boîte noire. Cette approche est parfaitement valide pour des informations de sécurité, car c'est la vie des usagers routiers qui est en jeu. En revanche, pour les informations de divertissement, les utilisateurs sont rarement intéressés par tous les contenus qui peuvent circuler. Ils ne veulent accéder potentiellement qu'à une quantité de contenus utiles et spécifiques en fonction de leurs préférences personnelles.

Certains travaux ont pensé à pallier ce manque en proposant la solution de géo-dissémination dans les réseaux véhiculaires. Les contenus sont alors diffusés à des destinations confinées dans des régions géographiques spécifiques, et par conséquent les nœuds sources sont choisis dans certaines zones liées

au contenu [LW12]. Néanmoins, cette approche peut être extrêmement judicieuse pour certains types de contenus tels que les informations de trafic qui sont généralement intéressantes pour les utilisateurs qui se déplacent à proximité des zones sur lesquelles l'information porte. Au contraire, cela peut ne pas être très efficace pour d'autres types de contenus qui sont liés aux préférences personnelles de l'utilisateur et qui peuvent ne pas avoir de liens avec certaines zones spécifiques.

Dans ce chapitre, nous considérons les préférences des utilisateurs et nous nous intéressons aux choix des sources dans l'objectif de garantir un niveau de satisfaction significatif pour les usagers routiers.

3 Système considéré et problématique

Ce travail concerne les applications commerciales et de confort qui offrent différents services aux usagers routiers tout au long des routes. Ces informations auront par exemple l'objectif de les attirer vers des magasins prédéfinis (e.g. annonces sur les prix de l'essence, offres de restaurants au bord des autoroutes). Nous utilisons le terme 'objet' qui représente une information concernant un service spécifique, comme par exemple une annonce publicitaire d'une station service.

Soit $\mathcal{O} = \{ o_j \}$ l'ensemble des objets récupérés à partir du serveur de contenus. Chaque nœud v_i exprime explicitement ses préférences hétérogènes pour différentes thématiques prédéfinies $\mathcal{T} = \{ T_k \}$ (e.g. offre de restaurant, annonce d'une station de service...). Les préférences sont représentées comme dans les chapitres précédents par des valeurs d'intérêt variant de 0 à 10. Soit $I_{i,T_k} \in [0, 10]$ et $I_{i,j} \in [0, 10]$ les intérêts du nœud v_i pour la thématique T_k et l'objet o_j , respectivement. L'intérêt $I_{i,j}$ (intérêt de v_i pour o_j) est égal à l'intérêt I_{i,T_k} (intérêt de v_i pour T_k) lorsque o_j est un objet qui concerne la thématique T_k (e.g. l'objet o_j qui contient une offre de déjeuner du restaurant "Hippopotamus" est associé à la thématique "recommandations de restaurant"). Par conséquent, quand un nœud v_i reçoit un objet o_j concernant la thématique T_k , v_i aura ainsi une utilité $= I_{i,j} = I_{i,T_k}$. De plus, nous considérons qu'un nœud n'aura aucune utilité lorsqu'il reçoit un objet qu'il a déjà reçu (i.e. objet dupliqué) ou lorsqu'il reçoit un objet qui ne l'intéresse pas (i.e. $I_{i,j} = 0$).

Pour évaluer la satisfaction des utilisateurs après la dissémination des contenus, nous utilisons

encore une fois le *content utility rate* (voir équation 6.1) qui augmente à chaque fois qu'un nœud v_i reçoit un objet qui l'intéresse o_j (i.e. $I_{i,j} \neq 0$ et v_i n'a pas reçu o_j auparavant) avant que la durée de vie de o_j expire.

$$\text{Content Utility rate} = \frac{\sum_{o_j \text{ est reçu par } v_i} I_{i,j}}{\sum I_{i,j}} \quad (6.1)$$

Soit un objet o^* créé à l'instant T_e et avec une durée de vie T_{max} . Afin de maximiser la *content utility*, les sources de o^* doivent être choisies comme étant les nœuds qui permettent de produire un maximum d'utilité jusqu'à l'expiration de o^* comme montré dans l'équation 6.2.

$$seed = \arg \max_{v_k} \frac{\sum_{v_i \text{ a reçu } o^* \text{ avant } T_e + T_{max}} I_{i,o^*}}{\sum_{v_i} I_{i,o^*}} \quad (6.2)$$

La dissémination de l'objet o^* commence dès sa création à l'instant T_e jusqu'à son expiration $T_e + T_{max}$. Il est illusoire de vouloir résoudre ce problème à moins de connaître les positions futures de tous les véhicules sur la période de temps $[T_e, T_e + T_{max}]$! Nous allons tout d'abord étudier la possibilité de prévoir les futurs contacts dans les réseaux véhiculaires en élargissant les propositions des chapitres précédents qui se cantonnaient à une vision très locale du réseau.

4 Prédiction des futurs contacts dans les réseaux véhiculaires

Plusieurs travaux ont étudié et exploité la prédiction des futurs contacts dans les réseaux véhiculaires afin d'améliorer la performance de la dissémination de contenus [QZZ⁺14, ZDC⁺13, LCM10, MCCF14, KLG14a]. Ces méthodes de prédiction de futurs contacts peuvent être principalement divisées en trois catégories :

- (i) **Contact-frequency based** [QZZ⁺14, ZDC⁺13] : certaines approches reposent sur l'observation, provenant de la collecte et de l'analyse de traces réelles de contacts entre les véhicules, que les contacts entre véhicules ont une corrélation temporelle. Par conséquent, les historiques de contacts peuvent être utilisés pour comprendre le comportement des nœuds et estimer ainsi les futurs contacts. En premier lieu, cette méthode peut prendre beaucoup de temps pour collecter les traces des véhicules puisque de telles informations ne sont pas disponibles initialement. En

deuxième lieu, des véhicules seront ignorés puisqu'ils ne sont pas présents sur les routes considérées (e.g. la voiture d'un touriste qui visite une ville pour une courte période de temps et donc n'a pas de contact préalable avec les autres véhicules de cette ville).

(ii) *Vehicle path-based* [LCM10] : cette approche repose sur la disponibilité des itinéraires dans l'OBU des véhicules (i.e. chemins) afin de prédire les futures rencontres. Cependant, généralement, les utilisateurs ont tendance à éviter d'utiliser les systèmes de navigation pour aller aux endroits habituels tels que le travail ou le domicile.

(iii) *Centralized-based* [KLG14a, MCCF14] : puisque un véhicule ne peut avoir qu'une vue limitée du réseau (i.e. voisinage), une méthode centralisée a été proposée pour la prédiction des futurs contacts dans un environnement véhiculaire. Les véhicules envoient périodiquement leur emplacements et d'autres informations à un équipement central qui sera capable d'avoir une vue plus large du réseau. Par conséquent, cet équipement peut prendre des décisions intelligentes pour de nombreuses tâches telles que la sélection des sources et la diffusion de contenus. L'effet secondaire de cette méthode est la nécessité d'échanges supplémentaires avec un équipement central pour construire le graphe de connectivité des nœuds.

La méthode *Contact frequency-based* nécessite la collecte et la compréhension du comportement des nœuds qui peut durer beaucoup de temps (des semaines comme montré dans l'analyse des traces de bus et de taxis dans [QZZ⁺14]). La deuxième méthode, *Vehicle path-based*, semble irréaliste puisqu'un utilisateur ne configure pas ses chemins lors des déplacements aux endroits qu'il fréquente souvent. Par conséquent, nous jugeons que la méthode *centralized-based* est la plus réaliste et c'est celle-ci que nous allons considérer dans la suite pour la prédiction des futurs contacts. Elle nécessite un élément central permettant de communiquer avec les véhicules et pouvant choisir les sources lorsqu'un nouvel objet est disponible. Comme exemple de moyen permettant de répondre à ce besoin, nous avons opté pour le paradigme SDN. Dans la section suivante, nous expliquons ce choix de SDN.

Pourquoi SDN ?

Les architectures actuelles des réseaux véhiculaires manquent de flexibilité et font du déploiement de services ou de protocoles à grande échelle un défi difficile à relever. Récemment, plusieurs travaux

ont montré un intérêt pour l'utilisation du paradigme SDN dans les réseaux véhiculaires [KLG⁺14b, TLGD15, CGW14, MOT12]. Ces travaux ont montré que SDN peut être utilisé pour fournir la flexibilité et la programmabilité aux réseaux et introduire par là-même de nouveaux services et fonctionnalités dans des réseaux véhiculaires. Pour cela, nous avons pensé qu'un même élément central connecté aux véhicules peut être utilisé pour différentes fonctionnalités et services.

C'est pour cela que nous avons choisi d'utiliser ce paradigme SDN ; le contrôleur SDN sera donc l'élément central qui permet la prédiction des futurs contacts. Il est à noter que dans ce chapitre, SDN n'est qu'un moyen possible que nous utilisons pour la sélection des sources. Ce choix pourrait parfaitement être mis en œuvre avec d'autres principes en considérant simplement un élément centralisé tel qu'un serveur accessible par l'intermédiaire des réseaux cellulaires.

5 SDN-SIEVE

Dans cette partie, nous allons d'abord décrire le système considéré et l'exploitation du SDN pour l'*offloading* du trafic cellulaire. Ensuite, nous détaillons notre solution appelée *SDN-based Seed selection scheme for maximally satisfying commuters interests in Vehicular networks* (SDN-SIEVE) pour la sélection des nœuds sources.

5.1 Système considéré

Ce travail considère un *Software-Defined Vehicular Networking* (SDVN) comme illustré dans la figure 6.2. L'architecture du SDVN se compose principalement des éléments suivants :

- (i) **Contrôleur SDN** qui représente l'intelligence logique centrale du SDN ;
- (ii) **des nœuds mobiles sans fil SDN**, il s'agit de l'ensemble des véhicules $\mathcal{V} = \{v_i\}$ qui envoient périodiquement des messages de *beacon* au contrôleur SDN contenant des informations sur les véhicules et/ou sur les utilisateurs. Cela permet au contrôleur d'avoir une vue globale et de contrôler ainsi le comportement du réseau en prenant des décisions efficaces en comparaison avec les nœuds qui ont forcément une vision limitée. Le système comprend aussi un
- (iii) **serveur de contenus** à partir duquel les nœuds sources téléchargent initialement les contenus au travers

du (iv) **réseau cellulaire**.

Chaque véhicule embarque un **OBU** équipé de deux technologies sans fil utilisées pour les communications du plan de contrôle et du plan de données [KLG⁺14b]. Ce sera typiquement le **LTE** offrant une connexion sans fil à longue portée et le **WiFi** permettant des communications sans fil à haut débit.

La figure 6.2 montre les communications entre les différents éléments considérés dans le **SDVN** : (i) les communications du plan de contrôle entre le contrôleur SDN et les véhicules ; (ii) le plan de données représentant les communications entre véhicules (i.e. **V2V**) ; (iii) et les communications entre les véhicules et le serveur de contenus qui sont établies à travers les réseaux cellulaires.

Pour des raisons de simplicité et sans perte de généralité, nous supposons dans la suite qu'un véhicule est associé uniquement à un utilisateur qui peut être le conducteur ou un passager. Dans ce qui suit, les termes 'véhicules', 'utilisateurs' et 'nœuds' sont utilisés de manière interchangeable.

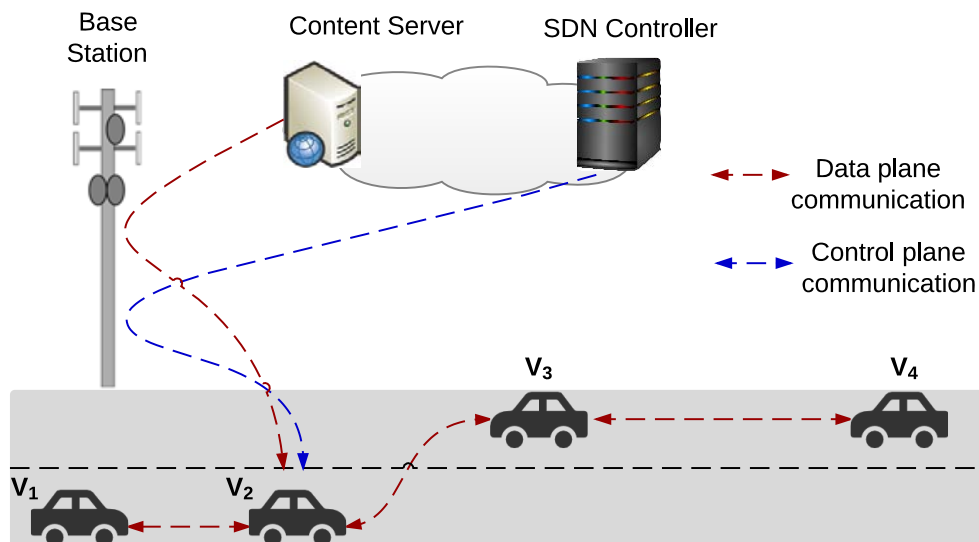


FIGURE 6.2 – Software-defined vehicular networks

5.2 Description de SDN-SIEVE

Dans ce qui suit, nous allons présenter **SDN-SIEVE** notre solution qui considère à la fois les préférences hétérogènes des nœuds et la prédiction des futurs contacts pour une sélection efficace des sources. À la différence des autres approches, **SDN-SIEVE** a pour objectif de maximiser l'utilité des utilisateurs par rapport aux contenus reçus. La figure 6.3 illustre les différentes phases de **SDN-SIEVE** : (i) la collecte des informations des véhicules, (ii) la prédiction des futurs contacts, (iii) l'estimation de l'utilité qu'un nœud peut produire et le choix des sources et enfin (iv) le téléchargement et la dissémination de l'objet.

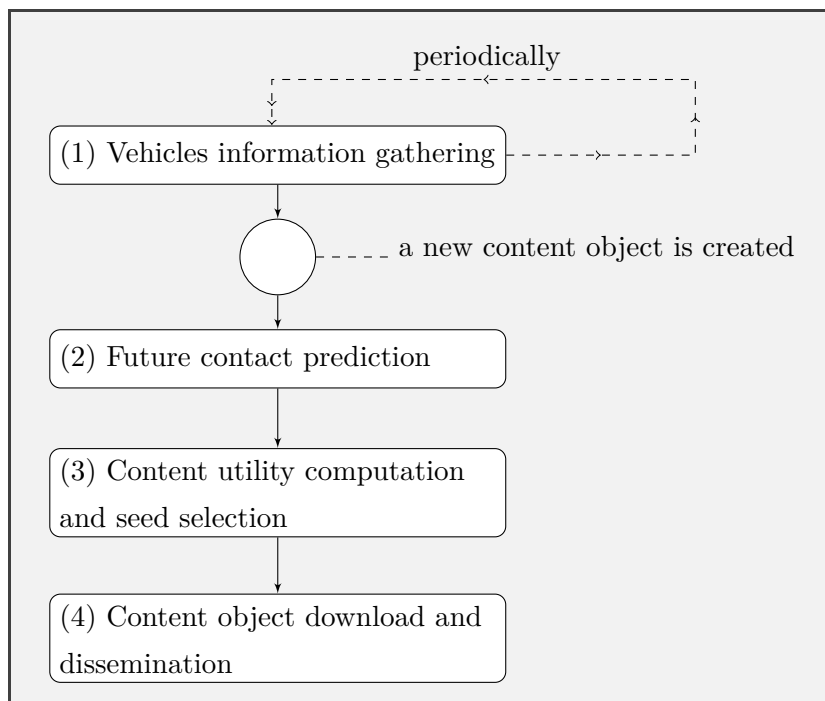


FIGURE 6.3 – SDN-SIEVE phases

5.2.1 Collecte des informations des véhicules

Le contrôleur SDN reçoit périodiquement des messages de *beacon* à partir des nœuds, lui permettant d'obtenir une meilleure vision du réseau. Le message de *beacon* comprend :

$$\langle x, y, s, \vec{dir}, seq \rangle$$

où le couple (x, y) représente les coordonnées géographiques (i.e. l'emplacement actuel) du véhicule ; 's' et \vec{dir} représentent la vitesse et la direction du véhicule, respectivement et 'seq' est une séquence qui contient les intérêts de l'utilisateur pour des thématiques prédéfinies. Les messages de *beacon* sont envoyés périodiquement à chaque période de temps $Time_B$.

Le contrôleur SDN stocke les informations collectées périodiquement auprès des véhicules. Elles seront utilisées dans un premier temps pour prédire les futurs nœuds sur lesquels chaque nœud v_i aura un impact. Quand un nouvel objet est créé, SDN-SIEVE commence les étapes suivantes du processus de sélection des sources.

5.2.2 Prédiction des futurs contacts

Comme expliqué dans la section 4, nous allons utiliser la prédiction des futures communications entre les véhicules en utilisant la méthode centralisée.

En utilisant les messages de *beacon* reçus, le contrôleur SDN fragmente le temps en laps de durée $Time_B$ qui correspond à la période de temps entre deux échanges consécutifs de messages de *beacon*. Ces messages de *beacon* permettent au contrôleur SDN de prédire les futurs contacts sur une échelle de temps relativement courte. En effet, connaissant les positions, les directions et les vitesses des véhicules, le contrôleur SDN exploite ces informations pour estimer les futurs mouvements des véhicules sur un horizon temporel du futur proche $N \times Time_B$ ($N \in \mathbb{N}$) avec une granularité de temps $Time_B$ [MCCF14].

Dans ce qui suit, nous supposons que le contrôleur SDN peut prédire la mobilité des véhicules et ainsi les futurs contacts.

Nous noterons $\mathcal{L}_{v_i, T}$ la liste des nœuds sur lesquels le nœud v_i aura un impact pendant la période de temps T . Ce seront les nœuds susceptibles de recevoir un objet initialement possédé par v_i avant

l'expiration de la période T . La figure 6.4 illustre un exemple de nœuds sur lesquels le nœud v_1 aura un impact pendant la période $[t, t + 5Time_B]$ où $\mathcal{L}_{v_1, [t, t + 5Time_B]} = \{v_i | i \in [2, 10]\}$. Par conséquent, si v_1 possède un objet o_j à l'instant t , les nœuds $\mathcal{L}_{v_1, [t, t + 5Time_B]}$ sont susceptibles de recevoir o_j pendant la période de temps $[t, t + 5Time_B]$.

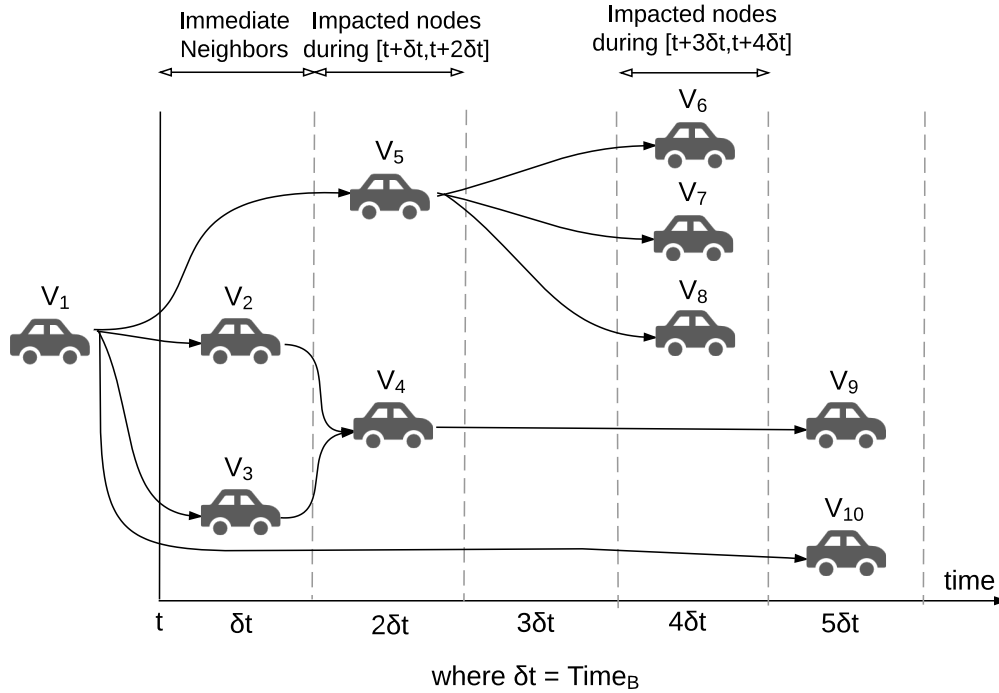


FIGURE 6.4 – Illustration des contacts sur une période de temps

5.2.3 Estimation de l'utilité qu'un nœud peut produire et choix des sources

Afin d'estimer la valeur du *content utility* qu'un nœud peut produire, la connaissance des contacts courants et futurs de v_k est nécessaire. Ainsi, quand un nouvel objet est créé à l'instant T_e , le contrôleur SDN détermine la liste des nœuds sur lesquels chaque nœud v_i aura un impact pendant la période $[T_e, T_e + NTime_B]$. Ensuite, connaissant les intérêts des nœuds le contrôleur SDN calcule l'utilité que v_i peut produire (équation 6.3).

$$\text{Content_utility}(v_i, o_j) = \sum_{v_k \in \mathcal{L}_{v_i, [t, t + NTime_B]}} I_{k,j} \quad (6.3)$$

En toute rigueur si l'on cherche à trouver les k meilleures sources, il faudrait tenir compte des doublons que pourraient recevoir les nœuds. Qui plus est, trouver la meilleure source, éliminer les nœuds sur lesquels elle aura un impact et recommencer la recherche ne conduit toujours pas à l'optimum global. En raison de la complexité des calculs nous mettrons en place une solution plus simple et implantable.

Le contrôleur SDN trie tous les nœuds selon leurs utilités estimées. Ensuite il sélectionne comme sources les k nœuds présentant les meilleures utilités. Finalement, le contrôleur SDN envoie un message de contrôle pour les nœuds choisis comme sources pour effectuer l'étape finale : *téléchargement et dissémination de l'objet*. Le nombre de nœuds sources sera forcément supérieur ou égal à 1.

5.2.4 Téléchargement et dissémination de l'objet

Quand un nœud, choisi comme source, reçoit le message de contrôle du contrôleur SDN, il doit alors télécharger l'objet à partir du serveur de contenus via le réseau cellulaire. Ensuite, cette source diffuse l'objet téléchargé en utilisant les communications opportunistes entre les véhicules (i.e. V2V). Par conséquent, l'objet peut être disséminé progressivement partout dans le réseau jusqu'à l'expiration de sa durée de vie.

5.3 Algorithme de SDN-SIEVE

L'algorithme 1 présente le *pseudo-code* du mécanisme de sélection de sources SDN-SIEVE. Il résume le comportement de SDN-SIEVE. Cet algorithme est exécuté chaque fois qu'un nouvel objet o_j est créé et est disponible pour être diffusé vers les différents nœuds du réseau (Ligne 1). Soit T_e l'instant de création de l'objet. Soit N le nombre de laps de temps durant lesquels le contrôleur SDN estime les futurs contacts (Ligne 2).

Les Lignes 3-15 permettent de déterminer la liste des nœuds impactés par chaque véhicule $v_i \in \mathcal{V}$ pendant la période de temps $[T_e, T_e + NTime_B]$. Cela est effectué par l'analyse des différents rencontres entre les véhicules sur l'ensemble des N laps de temps. Ensuite, avec la connaissance de la liste des nœuds sur lesquels chaque véhicule v_i aura un impact, \mathcal{L}_{v_i} , la Ligne 16 permet de calculer et stocker la valeur d'utilité que v_i peut produire en utilisant à la fois la liste \mathcal{L}_{v_i} et les intérêts des nœuds. Les valeurs d'utilité de tous les nœuds sont alors stockées dans un vecteur C_U . Si l'on

considère que N_{seeds} est le nombre de sources qui seront sélectionnées pour l'objet o_j , le contrôleur SDN sélectionne alors les N_{seeds} nœuds ayant les valeurs d'utilité les plus élevées. Pour cela, tout d'abord, la ligne 18 permet de trier dans un ordre descendant le vecteur contenant les utilités des différents nœuds. Finalement, les Lignes 19-22 permettent de déterminer et de choisir les N_{seeds} ayant les valeurs d'utilité les plus élevées comme source(s) pour l'objet créé.

5.4 Discussion

Nombre de sources supérieur à 2 : Lorsque le nombre de sources est supérieur ou égal à 2, nous choisissons comme sources les nœuds ayant les valeurs d'utilité maximales. Ce choix ne considère pas certains paramètres qui pourront certainement améliorer la sélection des sources. Par exemple, une corrélation peut exister entre les nœuds en particulier dans leurs rencontres avec les autres nœuds. Dans ce cas, il serait important de prendre en compte les nœuds qui seront desservis par les mêmes sources dans l'estimation de l'utilité. En outre, si l'on considère une grande zone géographique, le réseau peut visiblement être divisé en sous-zones parmi lesquelles certaines contiennent des nœuds isolés. Considérer cette contrainte et essayer d'atteindre tous les nœuds dans le réseau est important. Par exemple, les sources seront choisies dans des zones différentes. On peut aussi envisager que le nombre de sources par sous-zone soit choisi en fonction de sa taille.

Échelle de temps de prédiction des futurs contacts : La prédiction des futurs contacts permet la connaissance de l'état futur du réseau et par conséquent l'utilité que peut produire un nœud. Cette prédiction est un défi majeur en raison de l'environnement véhiculaire contraignant. D'une part, elle ne devrait pas se faire sur une longue échelle de temps pour conserver une prédiction fiable avec un minimum d'erreur. En effet, il serait difficile de prévoir l'itinéraire d'un véhicule pendant des minutes puisqu'il peut changer de direction dans quelques secondes (sauf peut-être sur une autoroute). D'autre part, elle ne devrait pas être menée sur une courte échelle de temps puisque cela risque de ne pas apporter beaucoup de profit à la dissémination. Par exemple, prédire les futurs contacts sur une échelle de 10 secondes risque de ne rien améliorer en raison des faibles rencontres qui peuvent avoir lieu pendant cette courte période. Par conséquent, il est important d'étudier et de trouver l'échelle de temps optimale pour la prédiction.

Algorithme 1 SDN-SIEVE : Sélection des sources initiales pour l'objet o_j

```

1: A new content object  $o_j$  is created at event Time :  $T_e$ 
2:  $N \leftarrow$  number of prediction' time slots
3: for  $v_i$  in  $\mathcal{V}$  do
4:   Determine  $D(v_i)$  direct neighbors of  $v_i$  {#  $D(v_i)$  corresponds to the period  $[T_e, T_e + Time_B]$ }
5:    $\mathcal{L}_{v_i} \leftarrow \{v_i, D(v_i)\}$ 
6:    $n \leftarrow 1$ 
7:   while  $n < N$  do
8:      $P \leftarrow [T_e + n \times Time_B, T_e + (n + 1) \times Time_B]$ 
9:      $List_{copy} \leftarrow \mathcal{L}_{v_i}$ 
10:    for  $v_k$  in  $List_{copy}$  do
11:      Predict  $FC(v_k, P)$  {# future contacts of  $v_k$  during the period of time 'P'}
12:       $\mathcal{L}_{v_i} \leftarrow \mathcal{L}_{v_i} \cup FC(v_k, P)$ 
13:    end for
14:     $n \leftarrow n + 1$ 
15:  end while
    {#  $\mathcal{L}_{v_i}$  contains the list of impacted nodes by  $v_i$  during the period of time  $[T_e, T_e + N \times Time_B]$ }
16:   $C\_U(v_i, o_j) \leftarrow \sum_{k \in \mathcal{L}_{v_i}} I_{k,j}$ 
    {#  $C\_U$  is a vector which contains the estimated content utility of the different nodes}
17: end for
18:  $SORT_{v_i}(C\_U)$  in descending order
    {#  $C\_U[1]$  contains the id of the node which can produce the highest utility}
19:  $N_{seeds} \leftarrow$  number of seeds for the objet  $o_j$  &  $List\_seed_{o_j} \leftarrow \emptyset$ 
20: for  $k$  from 1 to  $N_{seeds}$  do
21:    $List\_seed_{o_j} \leftarrow List\_seed_{o_j} \cup C\_U[k]$ 
22: end for
23: return  $List\_seed_{o_j}$  {# each node  $\in List\_seed_{o_j}$  is selected as seed for  $o_j$ }

```

6 Évaluation des performances

6.1 Méthodologie suivie

Afin d'évaluer la performance de notre approche, des simulations ont été menées avec le simulateur [THE ONE](#) [KOK09]. Les simulations sont effectuées avec un ensemble de véhicules qui se déplacent à différentes vitesses [50km/h,110km/h] en suivant le modèle de mobilité *vehicular-based map-driven model* [KKO10]. Chaque véhicule est équipé d'un [OBU](#) caractérisé par une portée de transmission de 200 m et un débit de transmission de 6 Mbit/s pour les communications [V2V](#).

Chaque utilisateur exprime aléatoirement et uniformément ses intérêts pour les différentes thématiques. Un nombre de 100 objets de même taille sont créés avec un temps d'inter-création appartenant à l'intervalle [50, 100] secondes. Contrairement à la plupart des réseaux [DTN](#), les réseaux véhiculaires sont équipés d'[OBUs](#) caractérisés par de grandes capacités de stockage [MDNB14]. Par conséquent, dans ce qui suit, nous supposons que les équipements [OBUs](#) ne présentent pas de contraintes de mémoire.

Pour donner une idée de l'impact de cette échelle de temps sur la sélection des sources, nous avons effectué un simple scénario en faisant varier la période de prédiction. Le scénario considéré comporte un ensemble de 50 véhicules avec 200 objets de même taille, ayant une durée de vie de 30 min et créés chaque période $\in [50, 100]$. Pour chaque objet engendré, un ensemble de 4 sources initiales est désigné. Le tableau 6.1 montre la *content utility* que [SDN-SIEVE](#) atteint en fonction de la période de prédiction. L'augmentation de cette valeur de temps de prédiction a un effet instable sur les résultats obtenus. Dans notre scénario, cela est dû en premier lieu à la corrélation entre les nœuds que nous n'avons pas prise en compte. La tendance qui apparaît toutefois est que si l'on choisit une période courte, les prédictions de contacts seront assez bonnes mais l'on ne regarde qu'un horizon de temps court alors que si l'on prend une prédiction plus longue, on prévoira des utilités à plus long terme mais avec un risque plus fort de se tromper.

Comme mentionné auparavant, il sera ainsi nécessaire de déterminer la période optimale pour la prédiction des futurs contacts. Dans la suite, la prédiction des futurs contacts est effectuée pour une période de 10 laps de temps (i.e. 10 Time_B) où $\text{Time}_B = 4s$.

TABLE 6.1 – *Content utility* en fonction de la période de prédiction des futurs contacts

	$2Time_B$ (8s)	$6Time_B$ (24s)	$10Time_B$ (40s)	$15Time_B$ (1min)	$20Time_B$ (1min20s)	$23Time_B$ (1min32s)
SDN-SIEVE (Content utility rate)	78.2%	81.55%	88.04%	84.3%	77.3%	80.1%

Nous comparons [SDN-SIEVE](#) avec deux autres approches de sélection de sources comme suit :

- **Random** : les véhicules sources sont choisis d’une manière aléatoire. Au contraire des autres méthodes, la solution *random* ne nécessite pas d’échanges d’informations supplémentaires pour la sélection des sources.
- **Future centrality-based** [[QZZ+14](#)] : cette approche choisit les nœuds sources qui sont ceux qui occupent des rôles vitaux, en termes de centralité en fonction de l’état courant et de l’estimation des rencontres futures.

6.2 Résultats

Les premières simulations ont été effectuées pour montrer l’impact de la densité du réseau sur les mécanismes de sélection de sources. Par conséquent, nous avons considéré deux scénarios avec une faible et une forte densité. Les scénarios à faible densité considèrent un nombre de 20 véhicules, alors que les scénarios à forte densité considèrent un nombre de 100 véhicules.

Les objets ont la même taille égale à 1 MB et une durée de vie d’1 heure. Pour les premières simulations, un seul nœud source sera choisi pour chaque objet créé. Les simulations sont établies jusqu’à l’expiration de la durée de vie des objets.

Pour une faible densité, la figure [6.5](#) montre que [SDN-SIEVE](#) s’avère plus performant en termes de *content utility* et atteint 89% par rapport aux autres méthodes *future-centrality* et *random* qui produisent 83% et 74.5%, respectivement. Les différentes méthodes n’ont pas pu satisfaire tous les intérêts des utilisateurs avant l’expiration des objets (i.e. les différentes courbes ne convergent pas vers 100%), ce qui veut dire que certains objets n’ont pas été disséminés aux utilisateurs intéressés. En effet, avec une faible densité, les fréquences de contacts entre les nœuds sont faibles ce qui a donc

un impact plus important sur la sélection de sources. Par conséquent, il est nécessaire de choisir les sources de manière à disséminer les objets créés tout en garantissant un maximum d'utilité aux utilisateurs par rapport aux contenus reçus.

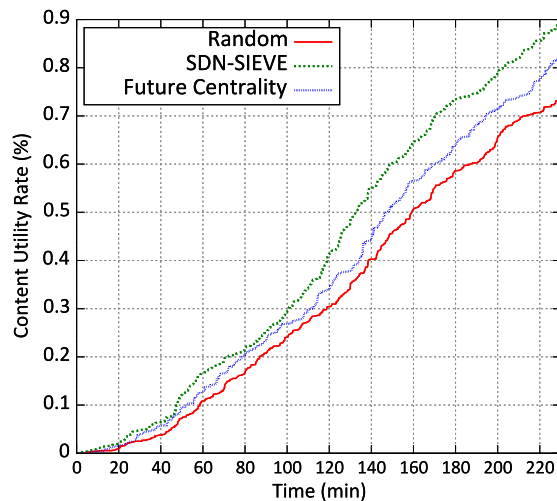


FIGURE 6.5 – Faible densité : content utility produite en fonction du temps

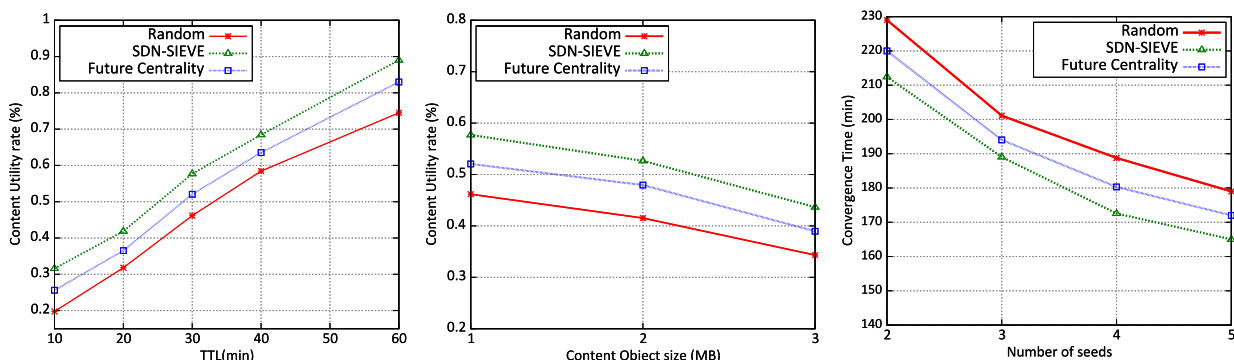
Avec un scénario avec une forte densité, nous avons remarqué que [SDN-SIEVE](#) produit des résultats similaires à ceux de *future centrality* et de *random*. En effet, les différentes méthodes permettent d'acheminer tous les objets engendrés aux différents utilisateurs intéressés avant l'expiration de la durée de vie des contenus, et par conséquent les différentes méthodes ont satisfait 100% des intérêts des utilisateurs au même instant 230 min. En effet, une forte densité entraîne une augmentation des fréquences de contacts entre les véhicules. Ainsi, la propagation des contenus engendrés peut s'étendre rapidement dans tout le réseau.

Par conséquent, en considérant une seule source par objet, la méthode de sélection de sources n'a pas d'impact sur la performance de la dissémination de contenus dans un réseau à haute densité. En revanche, dans un réseau à faible densité, une sélection efficace des sources permet de maximiser la satisfaction des intérêts des usagers routiers. De nos jours, les réseaux véhiculaires peuvent être considérés comme étant à faible densité pour deux raisons principales : rares sont les véhicules équipés par des [OBUs](#) (i.e. faible taux de pénétration) et certains nœuds présentent un comportement non

coopératif.

Dans ce qui suit, nous évaluons les performances des différentes méthodes de sélection de sources en faisant varier les différents paramètres suivants : TTLs (min), taille des objets (MB) et nombre de sources par objet en considérant des faibles puis des fortes densités. Les résultats de simulations sont présentés dans les figures 6.6 et 6.7.

Les deux figures 6.6a et 6.6b montrent que SDN-SIEVE conduit à de meilleures performances suivi par *Future-centrality* et *Random* en considérant différents TTLs et tailles d'objets. En faisant varier le nombre de sources par objet, nous étudions la période de temps nécessaire aux différentes méthodes pour satisfaire 90% des intérêts des utilisateurs par rapport aux objets disséminés dans le réseau comme montré dans la figure 6.6c. La figure montre que SDN-SIEVE nécessite moins de temps pour atteindre 90% de *content utility* que *Future-centrality* et *Random*. Cela montre que SDN-SIEVE permet de propager rapidement les objets aux utilisateurs intéressés.



(a) TTL (1 source; taille des objets=1MB) (b) Tailles des objets (TTL=30, 1 source) (c) Nombre de sources (TTL=60, taille des objets=1MB, convergence à 90% de content utility)

FIGURE 6.6 – Influence du TTL, de la taille des objets et du nombre de sources - faible densité

Avec une forte densité, nous avons remarqué que les différentes méthodes de sélection de sources conduisent à des résultats similaires en utilisant une source par objet. Par conséquent, nous avons étudié l'impact de la durée de vie des objets tout en gardant une source par objet. La figure 6.7a montre que SDN-SIEVE est légèrement plus performant que *future-centrality* et *random* pour des faibles valeurs de TTLs. En effet, quand la durée de vie des objets est limitée, il devient plus difficile

de disséminer les objets aux utilisateurs intéressés avec leur expiration. Par conséquent, le choix des sources aura un impact sur la performance de la dissémination de contenus. Les figures 6.7b et 6.7c illustrent que **SDN-SIEVE** s'avère plus performant que les autres méthodes pour différentes tailles d'objets et différents nombres de source par objet.

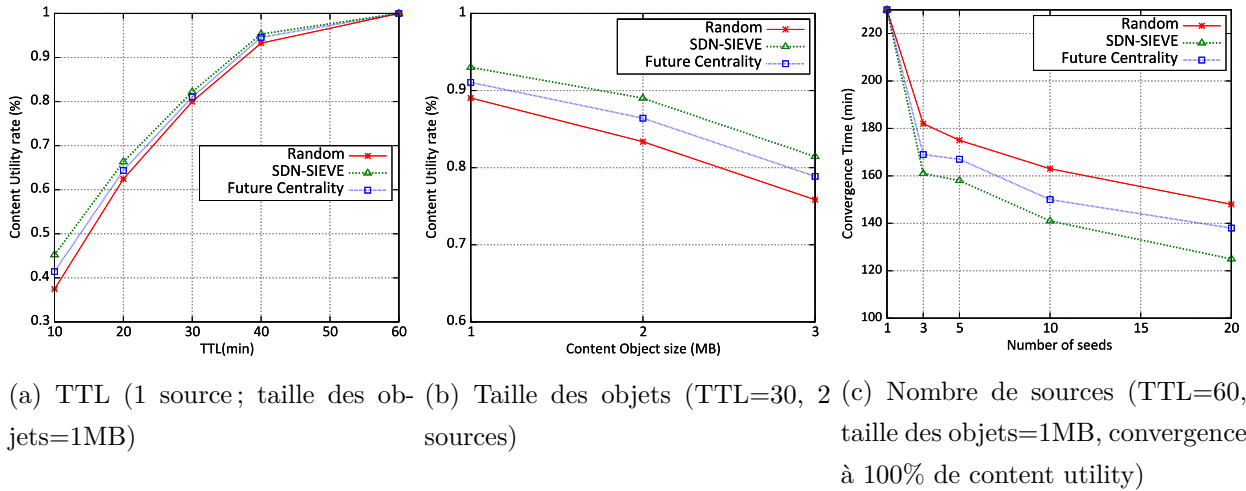


FIGURE 6.7 – Influence du TTL, de la taille des objets et du nombre de sources - forte densité

7 Discussion

L'architecture et la solution proposées pour la sélection des sources présentent des résultats positifs vis-à-vis des usagers routiers. En contre-partie, d'autres enjeux, qui ont forcément un impact sur l'*offloading* du trafic cellulaire, doivent être étudiés, parmi lesquels nous citons :

- **La densité du réseau** : nous avons évalué notre solution avec des scénarios considérant un nombre de véhicules limité (100 véhicules pour la forte densité) se déplaçant sur une zone réduite. Envisager des scénarios à plus grande échelle avec un nombre de véhicules important (e.g. supérieur à 2000 véhicules) et une large zone géographique sera intéressant pour valider la solution.
- **Le nombre de sources** : déterminer le nombre optimal de sources pour chaque objet créé est encore un défi important à relever. D'une part, ce nombre est lié au budget utilisé pour

rétribuer les sources (e.g. si B est le budget et c le coût nécessaire pour une source, alors B/c et le nombre de sources maximal). D'autre part, ce nombre doit être suffisant pour atteindre tous les nœuds intéressés par le contenu créé et pas trop grand pour éviter les duplications et les échanges inutiles.

- **Zones géographiques** : si on considère une large zone géographique, cette zone peut alors être découpée en sous-zones entre lesquelles les communications ne sont pas forcément très fréquentes (e.g. communications entre les véhicules qui se déplacent en centre-ville et ceux qui sont sur un périphérique). Par conséquent, choisir les sources dans une même zone (e.g. centre-ville) peut alors conduire à ignorer les véhicules situés dans d'autres zones et empêcher la propagation rapide des contenus vers tous les nœuds intéressés. Pour cela, considérer des zones géographiques pour la sélection des sources est un facteur important pour l'*offloading* du trafic cellulaire.
- **L'étude et l'analyse de la charge subie par le contrôleur SDN** : dans ce chapitre, nous avons considéré une prédiction des futures rencontres grâce aux échanges de messages de *beacon* des véhicules avec le contrôleur SDN. Cet échange sera effectué en utilisant des communications à longue portée de type LTE. Bien que ces messages de *beacon* soient de très petite taille (quelques bits), il sera nécessaire d'étudier et d'analyser la charge de cet échange de *beacon* sur le contrôleur SDN. En effet, le réseau véhiculaire constitue potentiellement un environnement à grand échelle. Par conséquent, ces échanges de *beacon* ne doivent pas trop alourdir le trafic subi par le réseau cellulaire.

8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'*offloading* du trafic cellulaire via les communications opportunistes. Pour cela, nous avons proposé une architecture qui peut être déployée dans un environnement SDN et qui profite des communications V2V afin de réduire le trafic cellulaire. Nous nous sommes intéressés alors à la phase initiale de l'*offloading* qui consiste à choisir les sources. Nous avons proposé une nouvelle méthode, appelée SDN-SIEVE, qui peut être déployée dans un environnement SDN.

Contrairement aux travaux existants, [SDN-SIEVE](#) considère les préférences des utilisateurs ainsi que la prédiction des futures rencontres sur une échelle de temps relativement courte entre les véhicules afin de choisir les nœuds sources. Les résultats ont montré que [SDN-SIEVE](#) permet de mieux satisfaire les intérêts des usagers routiers avec une sélection efficace des sources permettant d'améliorer la dissémination de contenus. Finalement, nous avons discuté plusieurs enjeux majeurs et les défis à relever pour un *offloading* efficace du trafic cellulaire.

Conclusion et Perspectives

A Conclusion

L'intégration des capacités de communication sans fil à courte portée dans les équipements mobiles a permis la création de nouveaux réseaux, dans lesquels les nœuds peuvent communiquer directement quand ils se rencontrent, sans avoir recours à une infrastructure pré-installée. En raison de la mobilité des nœuds et des ressources limitées des appareils mobiles, la connectivité dans ces réseaux peut subir des intermittences pendant de longues durées. De tels réseaux sont alors appelés réseaux mobiles tolérants aux délais.

La dissémination de contenus est l'un des défis fondamentaux dans ce contexte, un lien entre deux nœuds qui souhaitent communiquer ne pouvant être garanti. Nous nous sommes intéressés dans ce travail à la dissémination dans les réseaux véhiculaires qui font partie de ces réseaux mobiles tolérants aux délais et qui se distinguent par des caractéristiques spécifiques telles que la forte mobilité des véhicules. Tout au long de ce travail de recherche, nous avons pu constater l'influence des caractéristiques de l'environnement véhiculaire sur la dissémination de contenus et notamment sur la satisfaction des usagers routiers vis-à-vis les données qu'ils reçoivent. Ainsi, le protocole de dissémination utilisé devrait tenir compte de ces caractéristiques pour une meilleure utilisation des ressources du réseau et pour satisfaire au mieux les préférences des utilisateurs.

Nous avons tout d'abord mis en évidence ce constat dans le contexte [DTN](#) où les solutions de dissémination proposées ne semblent pas en mesure de faire face à ces contraintes intrinsèques et sont ainsi incapables de répondre aux intérêts des usagers routiers et de leur garantir un haut niveau de satisfaction. Les approches de dissémination proposées offrent des améliorations remarquables en

termes de délai et de taux de délivrance. Néanmoins, elles considèrent un seul type de contenus et ignorent les préférences des utilisateurs. Pour cela, nous avons proposé une nouvelle métrique pour l'évaluation de performances des protocoles de dissémination qui permet de déterminer le gain des utilisateurs vis-à-vis des contenus reçus.

Compte tenu des courtes durées de communication entre les véhicules qui ne garantissent ni la dissémination de tous les contenus possédés ni la participation de tous les nœuds dans la dissémination lors d'un contact, nous avons proposé un protocole de dissémination de contenus dans le contexte des réseaux véhiculaires qui considère à la fois des paramètres du réseau (durées des contacts) et des paramètres des utilisateurs (intérêts hétérogènes). Grâce à l'échange périodique de messages de *beacon* permettant la découverte de voisins et de leurs intérêts, notre protocole permet une sélection efficace des nœuds relais ainsi qu'un choix et un ordonnancement appropriés des objets disséminés afin de garantir une satisfaction maximale des utilisateurs. Une première série de simulations nous a permis de montrer que nos solutions permettent de disséminer les contenus créés de manière à garantir une excellente satisfaction des utilisateurs dans un environnement connu pour ses faibles durées de communication qui limitent le volume des contenus échangés.

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'implantation de nos solutions dans un environnement réel. Nous avons implanté le Bundle Protocol IBR-DTN sur un ensemble de trois machines avec des caractéristiques hétérogènes. Nous avons mis en place un simple scénario d'expérimentation, dans un environnement limité, au travers duquel nous avons validé fonctionnellement nos propositions. Cela nous a permis de découvrir des difficultés liées à l'hétérogénéité des équipements ainsi qu'aux temporisations utilisées pour la sélection de relais.

Finalement, nous nous sommes intéressés à l'*offloading* des réseaux cellulaires à travers les communications [V2V](#). En particulier, nous nous sommes intéressés au choix des sources initiales (*seeds*) dont le rôle consiste à télécharger des contenus des réseaux cellulaires puis de les propager grâce aux communications [V2V](#). Nous avons proposé une solution qui utilise les intérêts des utilisateurs et l'estimation des futurs contacts pour un choix efficace des sources. Nous choisissons alors les sources permettant de produire un maximum d'utilité en propageant ce contenu à ses futurs contacts. Grâce à des simulations nous avons montré que cette solution permet d'améliorer le niveau de satisfaction

des utilisateurs dans le réseau. Cette solution nécessite d'être déployée dans un environnement avec un élément central notamment un environnement SDN.

B Perspectives

B.1 Perspectives à court terme

Les scénarios que nous avons envisagés dans nos simulations et nos expérimentations en environnement réel restent encore limités, par exemple en nombre de véhicules ou encore en nombre et en taille des objets. Afin de s'assurer de l'efficacité de nos propositions dans l'ensemble des scénarios possibles, il pourrait être particulièrement intéressant de réaliser des tests à grande échelle. De la même façon nous avons considéré dans les différents scénarios que les objets créés sont de même taille et que les préférences des utilisateurs étaient souvent uniformément réparties. Considérer des objets avec différentes tailles serait intéressant puisque c'est le cas en environnement réel. L'engouement des utilisateurs pour certains types de contenus serait également assez représentatif et assez favorable à nos propositions. De même, étudier et analyser la charge induite par l'échange des messages de *beacon* que nous utilisons est important afin de montrer que cela n'a pas un réel impact et ne cause pas un *textitoverhead* trop grand dans le réseau.

Par ailleurs, la dissémination dépend essentiellement de la coopération entre les nœuds pour communiquer et partager les contenus. Cependant, les nœuds ont généralement un comportement égoïste ce qui peut influencer les performances des protocoles de dissémination. Par conséquent, considérer ce facteur dans la dissémination est important et proposer des solutions incitant les nœuds à coopérer constitue une extension très intéressante de nos travaux.

De plus, valider l'expérimentation réalisée en utilisant des nœuds mobiles (voitures) équipés du standard 802.11p serait certainement très instructif. Cela permettrait de mettre en évidence des paramètres importants tels que la distance entre les nœuds, la portée de transmission, la variabilité du canal et le débit et valider ainsi l'estimation des durées de contacts dans un environnement réel.

Finalement, l'estimation des futurs contacts peut améliorer la dissémination dans les réseaux véhiculaires. Une estimation fondée sur une méthode centralisée pourrait être étudiée. En effet, les

échanges périodiques entre les nœuds et l'équipement central, effectués au travers du réseau cellulaire, permettent à ce dernier de prévoir les futurs contacts. Néanmoins, dans ces approches il sera important d'étudier et analyser la surcharge induite sur le réseau cellulaire en raison de ces échanges, la fraîcheur des informations, la charge en termes de trafic et de calculs que l'élément central subira.

B.2 Perspectives à plus long terme

Nous pouvons tout d'abord remarquer que bien que les véhicules soient équipés par des moyens de communications à courte portée, cela reste insuffisant en raison de la variabilité de l'environnement (urbain, rural, autoroute) et du trafic routier (heure de pointe, jour, tard le soir). Cela a un impact sur les fréquences de communication entre les nœuds et sur la densité du réseau. Pour cela, proposer un paradigme de communication entre les réseaux véhiculaires et les réseaux de télécommunications tels que [LTE](#) serait utile pour ces deux types de réseaux. En effet, les réseaux véhiculaires pourraient être un moyen pour délester le grand volume de trafic que peut subir [LTE](#). [LTE](#) quant à lui offre les communications à longue portée qui permettent d'atteindre les nœuds isolés et d'établir des communications instantanées quand c'est nécessaire.

Un autre aspect qui pourrait prolonger les travaux de cette thèse serait l'intégration d'autres types de réseaux avec les réseaux véhiculaires. La communication d'un véhicule ne devrait pas se limiter aux autres véhicules qui se déplacent. Ainsi, il serait intéressant de permettre même à un piéton équipé d'un smartphone dans la rue de pouvoir communiquer et partager des contenus avec les usagers routiers. De même, les capteurs installés au bord de la route peuvent communiquer et informer les véhicules automatiquement avec les informations collectées. Cela permet d'étendre les réseaux véhiculaires et de minimiser les intermittences qui peuvent survenir.

Bien que les applications de divertissement et de confort aient par définition pour objectif le divertissement et le confort des usagers routiers, la sécurité de ces derniers reste toujours prioritaire. L'interconnexion entre le conducteur et l'[OBU](#) minimise sa concentration sur la route et risque alors d'engendrer des dangers sur la route. Par conséquent, inventer des moyens de communication qui minimisent les interactions entre le conducteur et l'[OBU](#) (e.g. communication par voix ou partage automatique) tout en garantissant la concentration du conducteur sur la route serait primordial afin

de préserver la vie des usagers routiers et leur offrir une route paisible.

Liste des publications

Article de journaux

1. F. Mezghani, R. Dhaou, M. Nogueira, and A.-L. Beylot, « Content Dissemination in Vehicular Social Networks : Taxonomy and User Satisfaction », in *IEEE Communications Magazine*, Volume 52, Issue 12, December 2014, pp. 34-40.

Articles de conférences internationales

2. F. Mezghani, R. Dhaou, M. Nogueira, and A.-L. Beylot, « Contact Lifespan and Interest-Based Content Dissemination in Vehicular Networks », in *IFIP Wireless Days (WD'14)*, IEEE, Rio de Janeiro, Brazil, November 2014, pp. 1-8.
3. F. Mezghani, R. Dhaou, M. Nogueira, and A.-L. Beylot, « Utility-Based Forwarder Selection for Content Dissemination in Vehicular Networks », in *IEEE International Conference on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2014)*, Washington D.C, September 2014.
4. F. Mezghani, R. Dhaou, M. Nogueira, and A.-L. Beylot, « Interest-based forwarding for satisfying user preferences in vehicular networks », in *In 6th International ICST Conference on Ad Hoc Networks (ADHOCNETS 2014)*, Rhodes, Greece, August 18-19, 2014, pp. 3-14.

Articles en préparation

5. F. Mezghani, R. Dhaou, M. Nogueira, and A.-L. Beylot, « Offloading Cellular Networks Through V2V Communications - How to Select the Seed-Vehicles ? ».

Bibliographie

- [AARS07] Ghassan MT Abdalla, Mosa Ali Abu-Rgheff, and Sidi Mohammed Senouci. Current trends in vehicular ad hoc networks. *UbiCC Journal - Special issue of UbiRoads*, 2007.
- [BCF⁺99] Lee Breslau, Pei Cao, Li Fan, Graham Phillips, and Scott Shenker. Web Caching and Zipf-like Distributions : Evidence and Implications. *IEEE INFOCOM*, pages 126–134, 1999.
- [BGJL06] John Burgess, Brian Gallagher, David Jensen, and Brian Neil Levine. MaxProp : Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks. *IEEE INFOCOM*, pages 1–11, 2006.
- [BLV07] Aruna Balasubramanian, Brian Levine, and Arun Venkataramani. DTN routing as a resource allocation problem. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 37(4) :373–384, 2007.
- [BP13] Chiara Boldrini and Andrea Passarella. Data dissemination in opportunistic networks. *Mobile Ad Hoc Networking : Cutting Edge Directions*, pages 453–490, 2013.
- [BSB⁺14] Nabil Benamar, Kamal D Singh, Maria Benamar, Driss El Ouadghiri, and Jean-Marie Bonnin. Routing protocols in vehicular delay tolerant networks : A comprehensive survey. *Computer Communications*, 48 :141–158, 2014.
- [Bur07] Scott Burleigh. Interplanetary overlay network : An implementation of the DTN bundle protocol. *IEEE CCNC*, pages 222–226, 2007.

- [CCC⁺12] Dukhyun Chang, Kideok Cho, Nakjung Choi, Ted Taekyoung Kwon, and Yanghee Choi. A probabilistic and opportunistic flooding algorithm in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 35(4) :500–506, 2012.
- [CDI11] Nicolas Cenerario, Thierry Delot, and Sergio Ilarri. A Content-Based Dissemination Protocol for VANETs : Exploiting the Encounter Probability. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3) :771–782, 2011.
- [CFBF11] Daniel Câmara, Nikolaos Frangiadakis, Christian Bonnet, and Fethi Filali. Vehicular delay tolerant networks. *Handbook of research on mobility and computing : evolving technologies and ubiquitous impacts*, pages 356–367, 2011.
- [CGSR12] Haksoo Choi, Raghu Ganti, Mudhakar Srivatsa, and Ramya Raghavendra. Content Dissemination Protocols in Hybrid Wireless Networks. *The Annual Conference of U.S. Army Information Technology Agency (ACITA)*, 2012.
- [CGW14] Yi Cao, Jinhua Guo, and Yue Wu. SDN enabled content distribution in vehicular networks. *Fourth International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH)*, pages 164–169, 2014.
- [CIS15] Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update (2014-2019). http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html, (last access on june 2015), 2015.
- [CL12] Yung-Jen Chuang and Kate Ching-Ju Lin. Cellular traffic offloading through community-based opportunistic dissemination. *IEEE WCNC*, pages 3188–3193, 2012.
- [CLGH10] Pei-Chun Cheng, Kevin C. Lee, Mario Gerla, and Jérôme Härri. GeoDTN+Nav : Geographic DTN Routing with Navigator Prediction for Urban Vehicular Environments. *MONET*, 15(1) :61–82, 2010.

- [CLZ⁺14] Nan Cheng, Ning Lu, Ning Zhang, Xuemin Shen, and Jon W. Mark. Vehicular WiFi offloading : Challenges and solutions. *Vehicular Communications*, 1(1) :13–21, 2014.
- [CQLX11] Zhide Chen, Yihui Qiu, Jingjing Liu, and Li Xu. Incentive mechanism for selfish nodes in wireless sensor networks based on evolutionary game. *Computers & Mathematics with Applications*, 62(9) :3378–3388, 2011.
- [CSD10] Mohamed Oussama Cherif, Sidi-Mohammed Secouci, and Bertrand Ducourthial. How to disseminate vehicular data efficiently in both highway and urban environments? *IEEE WiMob*, pages 165–171, October 2010.
- [CSD13] Mohamed Oussama Cherif, Sidi-Mohammed Senouci, and Bertrand Ducourthial. Efficient data dissemination in cooperative vehicular networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 13(12) :1150–1160, 2013.
- [CSZ11] Ho Ting Cheng, Hangguan Shan, and Weihua Zhuang. Infotainment and road safety service support in vehicular networking : From a communication perspective. *Mech. Syst. Signal Process., Special Issue on Integrated Vehicle Dynamics*, 25(6) :2020 – 2038, 2011.
- [Cur13] Sophie Curtis. Can you survive on 4G alone? <http://www.telegraph.co.uk/technology/internet/10272292/Can-you-survive-on-4G-alone.html>, (last access on July 2015), 2013.
- [DBB13] Marco Di Felice, Luca Bedogni, and Luciano Bononi. Group communication on highways : An evaluation study of geocast protocols and applications. *Ad Hoc Networks*, 11(3) :818–832, 2013.
- [DCI08] Thierry Delot, Nicolas Cenerario, and Sergio Ilarri. Estimating the Relevance of Information in Inter-Vehicle Ad Hoc Networks. *IEEE International Conference on Mobile Data Management Workshops (MDMW)*, pages 151–158, 2008.

- [DH07] Elizabeth M. Daly and Mads Haahr. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs. *ACM MobiHoc*, pages 32–40, 2007.
- [DHHL11] Savio Dimatteo, Pan Hui, Bo Han, and Victor OK Li. Cellular traffic offloading through WiFi networks. *IEEE MASS*, pages 192–201, 2011.
- [DILC13] Thierry Delot, Sergio Ilarri, Sylvain Lecomte, and Nicolas Cenerario. Sharing with caution : Managing parking spaces in vehicular networks. *Mobile Information Systems*, 9(1) :69–98, 2013.
- [DLMW08] Michael Doering, Sven Lahde, Johannes Morgenroth, and Lars Wolf. IBR-DTN : an efficient implementation for embedded systems. *Proceedings of the Third Workshop on Challenged Networks, CHANTS*, pages 117–120, 2008.
- [DPPW11] Michael Doering, Wolf-Bastian Pöttner, Tobias Pögel, and Lars Wolf. Impact of radio range on contact characteristics in bus-based delay tolerant networks. *IEEE WONS 2011*, pages 195–202, 2011.
- [Fal03] Kevin R. Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. *ACM SIGCOMM*, pages 27–34, 2003.
- [FYC11] Ridong Fei, Kun Yang, and Xueqi Cheng. A Cooperative Social and Vehicular Network and its Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm. *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 63–67, 2011.
- [GC11] Wei Gao and Guohong Cao. User-centric data dissemination in disruption tolerant networks. *IEEE INFOCOM*, pages 3119–3127, 2011.
- [GPP⁺15] Giulio Grassi, Davide Pesavento, Giovanni Pau, Lixia Zhang, and Serge Fdida. Navigo : Interest Forwarding by Geolocations in Vehicular Named Data Networking. *CoRR*, abs/1503.01713, 2015.

- [GTN⁺14] Marco Gramaglia, Óscar Trullols-Cruces, Diala Naboulsi, Marco Fiore, and María Calderón. Vehicular networks on two Madrid highways. *IEEE SECON*, pages 423–431, 2014.
- [HC08] Elyes Ben Hamida and Guillaume Chelius. Strategies for data dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications Magazine*, 15, 2008.
- [HCY11] Pan Hui, Jon Crowcroft, and Eiko Yoneki. Bubble rap : Social-based forwarding in delay-tolerant networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(11) :1576–1589, 2011.
- [HHK⁺10] Bo Han, Pan Hui, VS Kumar, Madhav V Marathe, Guanhong Pei, and Aravind Srinivasan. Cellular traffic offloading through opportunistic communications : a case study. *ACM workshop on Challenged networks (CHANTS)*, pages 31–38, 2010.
- [HHK⁺12] Bo Han, Pan Hui, VS Anil Kumar, Madhav V Marathe, Jianhua Shao, and Aravind Srinivasan. Mobile data offloading through opportunistic communications and social participation. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 11(5) :821–834, 2012.
- [HL08] Hannes Hartenstein and Kenneth P Laberteaux. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(6) :164–171, 2008.
- [IBR] IBR-DTN. <https://www.ibr.cs.tu-bs.de/projects/ibr-dtn/>, (last access on june 2015).
- [IRD⁺13] João NG Isento, Joel JPC Rodrigues, Joao Dias, Maicke CG Paula, Alexey Vinel, et al. Vehicular delay-tolerant networks ? A novel solution for vehicular communications. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 5(4) :10–19, 2013.
- [JOW⁺02] Philo Juang, Hidekazu Oki, Yong Wang, Margaret Martonosi, Li-Shiuan Peh, and Daniel Rubenstein. Energy-efficient computing for wildlife tracking : design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. *ACM Sigplan Notices*, 37(10) :96–107, 2002.

- [JWWH12] Gleneesha M Johnson Williams, Brenton Walker, and Angela Hennessy. A performance comparison of DTN bundle protocol implementations on resource constrained nodes. *ACM international workshop on Challenged networks*, pages 75–78, 2012.
- [KAE⁺11] Georgios Karagiannis, Onur Altintas, Eylem Ekici, Geert Heijenk, Boangoat Jarupan, Kenneth Lin, and Timothy Weil. Vehicular networking : A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(4) :584–616, 2011.
- [KBS12] Amir Krifa, Chadi Barakat, and Thrasyvoulos Spyropoulos. Message Drop and Scheduling in DTNs : Theory and Practice. *IEEE Transaction on Mobile Computing*, 11(9) :1470–1483, 2012.
- [KGGH⁺10] M. Kitsak, L. Gallos, S. Havlin, F. Liljeros, L. Muchnik, H. Stanley, and H. Makse. Identification of influential spreaders in complex networks. *Nature Physics*, 6 :888–893, 2010.
- [KK14] Richard Kershaw and Bhaskar Krishnamachari. Evaluation of Seed Selection Strategies for Vehicle to Vehicle Epidemic Information Dissemination. *IEEE MASS*, pages 581–585, 2014.
- [KKK06] Minkyong Kim, David Kotz, and Songkuk Kim. Extracting a Mobility Model from Real User Traces. *IEEE INFOCOM*, pages 1–13, 2006.
- [KKO10] Ari Keränen, Teemu Kärkkäinen, and Jörg Ott. Simulating Mobility and DTNs with the ONE. *Journal of Communications*, 5(2) :92–105, 2010.
- [KLG14a] Ian Ku, You Lu, and Mario Gerla. Software-Defined Mobile Cloud : Architecture, services and use cases. *IEEE IWCMC*, pages 1–6, 2014.
- [KLG⁺14b] Ian Ku, You Lu, Mario Gerla, Rafael Lopes Gomes, Francesco Ongaro, and Eduardo Cerqueira. Towards software-defined VANET : Architecture and services. *MED-HOC-NET*, pages 103–110, 2014.

- [KOK09] Ari Keränen, Jörg Ott, and Teemu Kärkkäinen. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. *SIMUTools*, page 55, 2009.
- [KOL] Vehicular mobility trace of the city of Cologne, Germany. <http://kolntrace.project.citi-lab.fr/>. (last access on July 2015).
- [Kor11] Leonhard Korowajczuk. *LTE, WiMAX and WLAN network design, optimization and performance analysis*. John Wiley & Sons, 2011.
- [LCC06] Ching-Ju Lin, Po-Lin Chou, and Cheng-Fu Chou. HCDD : hierarchical cluster-based data dissemination in wireless sensor networks with mobile sink. *IEEE IWCMC*, pages 1189–1194, 2006.
- [LCM09] Ilias Leontiadis, Paolo Costa, and Cecilia Mascolo. Persistent Content-based Information Dissemination in Hybrid Vehicular Networks. *IEEE PerCom*, pages 1–10, 2009.
- [LCM10] Ilias Leontiadis, Paolo Costa, and Cecilia Mascolo. Extending Access Point Connectivity through Opportunistic Routing in Vehicular Networks. *IEEE INFOCOM*, pages 486–490, 2010.
- [LDS04] Anders Lindgren, Avri Doria, and Olov Schelen. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *Service Assurance with Partial and Intermittent Resources*, pages 239–254, 2004.
- [Leo07] Ilias Leontiadis. Publish/subscribe notification middleware for vehicular networks. *ACM, IFIP, USENIX, Middleware doctoral symposium (MDS)*, page 12, 2007.
- [LLM10] Iván Lequerica, Miguel García Longaron, and Pedro M. Ruiz. Drive and Share : Efficient Provisioning of Social Networks in Vehicular Scenarios. *IEEE Communications Magazine*, pages 90–97, 2010.
- [LMG⁺09] Uichin Lee, Eugenio Magistretti, Mario Gerla, Paolo Bellavista, Antonio Corradi, Dipartimento Elettronica, and Informatica Sistemistica. Dissemination and Harvesting

- of Urban Data using Vehicular Sensing Platforms. *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 58(2) :882 – 901, 2009.
- [LQJ⁺15] Yong Li, Li Qiu, Depeng Jin, Li Su, Pan Hui, and Lieguang Zeng. Contact duration aware evaluation for content dissemination delay in mobile social network. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 15(3) :527–537, 2015.
- [LW12] Yujin Li and Wenye Wang. Geo-dissemination in vehicular ad hoc networks. *IEEE ICC*, pages 302–306, 2012.
- [LZJW14] Yong Li, Xiangming Zhu, Depeng Jin, and Dapeng Wu. Multiple Content Dissemination in Roadside-Unit-Aided Vehicular Opportunistic Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(8) :3947–3956, 2014.
- [MCCF12] Francesco Malandrino, Claudio Casetti, Carla-Fabiana Chiasserini, and Marco Fiore. Offloading cellular networks through ITS content download. *IEEE SECON*, pages 263–271, 2012.
- [MCCF14] Francesco Malandrino, Claudio Casetti, Carla-Fabiana Chiasserini, and Marco Fiore. Content Download in Vehicular Networks in Presence of Noisy Mobility Prediction. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(5) :1007–1021, 2014.
- [MDNB14] Farouk Mezghani, Riadh Dhaou, Michele Nogueira, and André-Luc Beylot. Content dissemination in Vehicular Social Networks : Taxonomy and User satisfaction. *IEEE Communications Magazine*, 52(12) :34–40, 2014.
- [MDP03] K. Fall S. Jain M. Ho M. Demmer, E. Brewer and R. Patra. Implementing Delay Tolerant Networking. *Technical report, IRB-TR-04-020*, 2003.
- [MGC⁺07] Andrew G. Miklas, Kiran K. Gollu, Kelvin K. W. Chan, Stefan Saroiu, P. Krishna Gum-madi, and Eyal de Lara. Exploiting Social Interactions in Mobile Systems. *Ubiquitous Computing, 9th International Conference (UbiComp)*, pages 409–428, 2007.

- [MH09] Harald Meyer and Karin Anna Hummel. A geo-location based opportunistic data dissemination approach for MANETs. *ACM workshop on Challenged networks (CHANTS)*, pages 1–8, 2009.
- [MHM⁺12] Jingwei Miao, Omar Hasan, Sonia Ben Mokhtar, Lionel Brunie, and Kangbin Yim. An Analysis of Strategies for Preventing Selfish Behavior in Mobile Delay Tolerant Networks. *Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, IMIS*, pages 208–215, 2012.
- [Mor10] Yasser L Morgan. Managing DSRC and WAVE standards operations in a V2V scenario. *International Journal of Vehicular Technology*, 2010.
- [MOT12] Marc Mendonca, Katia Obraczka, and Thierry Turletti. The case for software-defined networking in heterogeneous networked environments. *ACM conference on CoNEXT student workshop*, pages 59–60, 2012.
- [MSJ09] Hassnaa Moustafa, Sidi-Mohammed Senouci, and Moez Jerbi. Introduction to Vehicular Networks. in *Vehicular Networks Techniques, Standards and Applications*, H. Moustafa and Y. Zhang, Eds., ed Boca Raton London New York : Taylor Francis Group, LLC, 2009.
- [NB06] Josiane Nzouonta and Cristian Borcea. STEID : A protocol for emergency information dissemination in vehicular networks. *Report, Department of Computer Science, New Jersey Institute of Technology*, 2006.
- [NG07] Vinod Namboodiri and Lixin Gao. Prediction-Based Routing for Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 56(4) :2332–2345, 2007.
- [PCR⁺12] Paulo Rogério Pereira, Augusto Casaca, Joel J. P. C. Rodrigues, Vasco N. G. J. Soares, Joan Triay, and Cristina Cervello-Pastor. From Delay-Tolerant Networks to Vehicular Delay-Tolerant Networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 14(4) :1166–1182, 2012.

- [PMM⁺10] Bence Pásztor, Luca Mottola, Cecilia Mascolo, Gian Pietro Picco, Stephen A. Ellwood, and David W. Macdonald. Selective Reprogramming of Mobile Sensor Networks through Social Community Detection. *Wireless Sensor Networks*, pages 178–193, 2010.
- [PMSW11a] Wolf-Bastian Pöttner, Johannes Morgenroth, Sebastian Schildt, and Lars Wolf. An Empirical Performance Comparison of DTN Bundle Protocol Implementations. *Informatikbericht 2011-08, Technische Universität Braunschweig*, 2011.
- [PMSW11b] Wolf-Bastian Pöttner, Johannes Morgenroth, Sebastian Schildt, and Lars Wolf. Performance comparison of DTN bundle protocol implementations. *ACM workshop on Challenged networks*, pages 61–64, 2011.
- [POL⁺09] Anna-Kaisa Pietiläinen, Earl Oliver, Jason LeBrun, George Varghese, and Christophe Diot. MobiClique : middleware for mobile social networking. *ACM workshop on Online social networks*, pages 49–54, 2009.
- [PSDG09] Michal Piorkowski, Natasa Sarafijanovic-Djukic, and Matthias Grossglauser. {CRAW-DAD} data set epfl/mobility (v. 2009-02-24). 2009.
- [QKW⁺10] Markus Quaritsch, K. Kruggl, Daniel Wischounig-Strucl, Subhabrata Bhattacharya, Mubarak Shah, and Bernhard Rinner. Networked UAVs as aerial sensor network for disaster management applications. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 127(3) :56–63, 2010.
- [QZZ⁺14] Jun Qin, Hongzi Zhu, Yanmin Zhu, Li Lu, Guangtao Xue, and Minglu Li. POST : Exploiting Dynamic Sociality for Mobile Advertising in Vehicular Networks. *IEEE INFOCOM*, pages 1761–1769, 2014.
- [RAZA10] Sulma Rashid, Qaisar Ayub, M.Soperi Mohd Zahid, and A.Hanan Abdullah. Optimization of DTN routing protocols by using forwarding strategy (TSMF) and queuing drop policy (DLA). *International Journal of Computer and Network Security*, 2(10) :71–75, 2010.

- [RKM09] Aleksandar Rodić, Dusko Katić, and Gyula Mester. Ambient Intelligent Robot-Sensor Networks for Environmental Surveillance and Remote Sensing. *SISY*, pages 39–44, 2009.
- [RP09] Antony Rowstron and Giovanni Pau. Characteristics of a vehicular network. *Technical Report 09-0017, University of California Los Angeles, Computer Science Department*, 2009.
- [RS12] R.S. Raw, Vikas Toor and N. Singh. Comprehensive Study of Estimation of Path Duration in Vehicular Ad Hoc Network. *ACITY (2)*, pages 309–317, 2012.
- [SFL⁺00] Min-Te Sun, Wu-Chi Feng, Ten-Hwang Lai, Kentaro Yamada, Hiromi Okada, and Kikuo Fujimura. GPS-based message broadcast for adaptive inter-vehicle communications. *Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE VTS-Fall VTC 2000. 52nd*, 6 :2685 – 2692, 2000.
- [SFM13] Razvan Stanica, Marco Fiore, and Francesco Malandrino. Offloading Floating Car Data. *IEEE WoWMoM*, pages 1–9, 2013.
- [SFR09] Vasco NGJ Soares, Farid Farahmand, and Joel JPC Rodrigues. A layered architecture for vehicular delay-tolerant networks. *IEEE ISCC*, pages 122–127, 2009.
- [SHSI08] Stephen Smaldone, Lu Han, Pravin Shankar, and Liviu Iftode. RoadSpeak : Enabling Voice Chat on Roadways using Vehicular Social Networks. *SocialNets*, pages 43–48, 2008.
- [SKNI13] Wenjie Sha, Daehan Kwak, Badri Nath, and Liviu Iftode. Social Vehicle Navigation : Integrating Shared Driving Experience into Vehicle Navigation. *ACM HotMobile*, page 16, 2013.
- [SMPW11] Sebastian Schildt, Johannes Morgenroth, Wolf-Bastian Pöttner, and Lars Wolf. IBR-DTN : A lightweight, modular and highly portable Bundle Protocol implementation. *Electronic Communications of the EASST*, 37 :1–11, 2011.

- [SOS⁺14] Ramon S. Schwartz, Anthony E. Ohazulike, Christoph Sommer, Hans Scholten, Falko Dressler, and Paul Havinga. On the applicability of fair and adaptive data dissemination in traffic information systems. *Ad Hoc Networks*, 13 :428–443, 2014.
- [SPR05] Thrasyvoulos Spyropoulos, Konstantinos Psounis, and Cauligi S. Raghavendra. Spray and Wait : An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks. *ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pages 252–259, 2005.
- [SRFN09] Vasco Nuno Gama Jesus Soares, Joel José Puga Coelho Rodrigues, Paulo Salvador Ferreira, and António Manuel Duarte Nogueira. Improvement of Messages Delivery Time on Vehicular Delay-Tolerant Networks. *International Conference on Parallel Processing Workshops ICPPW*, pages 344–349, 2009.
- [SXW⁺10] Piotr Szczurek, Bo Xu, Ouri Wolfson, Jie Lin, and Naphtali Rische. Learning the relevance of parking information in VANETs. *International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, pages 81–82, 2010.
- [TCLW12] Lijun Tang, Yi Chai, Yun Li, and Binbin Weng. Buffer Management Policies in Opportunistic Networks. *Journal of Computational Information Systems*, 8(12) :5149–5159, 2012.
- [TeSL⁺14] Fernando A Teixeira, Vinicius F e Silva, Jesse L Leoni, Daniel F Macedo, and José MS Nogueira. Vehicular networks using the IEEE 802.11 p standard : an experimental analysis. *Vehicular Communications*, 1(2) :91–96, 2014.
- [TFB12] Óscar Trullols-Cruces, Marco Fiore, and José M. Barceló-Ordinas. Cooperative Download in Vehicular Environments. *IEEE Trans. Mob. Comput.*, 11(4) :663–678, 2012.
- [TLGD15] Nguyen B Truong, Gyu Myoung Lee, and Yacine Ghamri-Doudane. Software Defined Networking-based Vehicular Adhoc Network with Fog Computing. *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, pages 1202–1207, 2015.

- [TML08] Yasser Toor, Paul Muhlethaler, and Anis Laouiti. Vehicle ad hoc networks : applications and related technical issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 10(3) :74–88, 2008.
- [TNCS02] Yu-Chee Tseng, Sze-Yao Ni, Yuh-Shyan Chen, and Jang-Ping Sheu. The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network. *Wireless Networks*, 8(2-3) :153–167, 2002.
- [TSVP14] Kanchana Thilakarathna, Aruna Seneviratne, Aline Carneiro Viana, and Henrik Petander. User generated content dissemination in mobile social networks through infrastructure supported content replication. *Pervasive and Mobile Computing*, 11 :132–147, 2014.
- [VB00] Amin Vahdat and David Becker. Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks. *Duke University Technical Report*, 2000.
- [VKR⁺05] Iuliu Vasilescu, Keith Kotay, Daniela Rus, Matthew Dunbabin, and Peter I. Corke. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network. *SenSys*, pages 154–165, 2005.
- [WAZ] WAZE : Waze Navigation Service. <https://www.waze.com/>, (last access on june 2015).
- [WTP⁺07] Nawaporn Wisitpongphan, Ozan K. Tonguz, Jayendra S. Parikh, Priyantha Mudalige, Fan Bai, and Varsha K. Sadekar. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications*, 14(6) :84–94, 2007.
- [WZZ13] Hongjian Wang, Yanmin Zhu, and Qian Zhang. Compressive sensing based monitoring with vehicular networks. *IEEE INFOCOM*, pages 2823–2831, 2013.
- [XLL⁺13] Feng Xia, Li Liu, Jie Li, Jianhua Ma, and Athanasios V Vasilakos. Socially Aware Networking : A Survey. *IEEE Systems Journal*, pages 1–18, 2013.
- [XLL⁺15] Feng Xia, Li Liu, Jie Li, Ahmedin Mohammed Ahmed, Laurence Tianruo Yang, and Jianhua Ma. BEEINFO : Interest-Based Forwarding Using Artificial Bee Colony for

- Socially Aware Networking. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(3) :1188–1200, 2015.
- [YZH⁺15] Hong Yao, Deze Zeng, Huawei Huang, Song Guo, Ahmrf Barnawi, and Ivan Stojmenovic. Opportunistic Offloading of Deadline-Constrained Bulk Cellular Traffic in Vehicular DTNs. *IEEE Transactions on Computers*, (99) :1, 2015.
- [ZDC⁺13] H Zhu, Mianxiong Dong, Shan Chang, Yanmin Zhu, Minglu Li, and XS Shen. ZOOM : Scaling the Mobility for Fast Opportunistic Forwarding in Vehicular Networks. *IEEE INFOCOM*, pages 2832–2840, 2013.
- [ZVID11] Gjergji Zyba, Geoffrey M. Voelker, Stratis Ioannidis, and Christophe Diot. Dissemination in opportunistic mobile ad-hoc networks : The power of the crowd. *IEEE INFOCOM*, pages 1179–1187, 2011.
- [ZW14] Xiao-Long Zheng and Meng Wan. A Survey on Data Dissemination in Wireless Sensor Networks. *J. Comput. Sci. Technol.*, 29(3) :470–486, 2014.
- [ZWZ⁺13] Huan Zhou, Jie Wu, Hongyang Zhao, Shaojie Tang, Canfeng Chen, and Jiming Chen. Incentive-Driven and Freshness-Aware Content Dissemination in Selfish Opportunistic Mobile Networks. *IEEE MASS*, pages 333–341, 2013.
- [ZZC09] Yang Zhang, Jing Zhao, and Guohong Cao. Roadcast : A popularity aware content sharing scheme in VANETs. *IEEE ICDCS*, pages 223–230, 2009.
- [ZZS⁺11] Liang Zhou, Yan Zhang, Kevin Song, Weiping Jing, and Athanasios V. Vasilakos. Distributed Media Services in P2P-Based Vehicular Networks. *IEEE T. Vehicular Technology*, 60(2) :692–703, 2011.