



Géolocalisation et communication en situation de crise

Florent Coriat

► To cite this version:

Florent Coriat. Géolocalisation et communication en situation de crise. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Sorbonne Université, 2018. Français. NNT : 2018SORUS340 . tel-01970777v2

HAL Id: tel-01970777

<https://theses.hal.science/tel-01970777v2>

Submitted on 11 Jun 2020

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

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

Thèse de doctorat de Sorbonne Université

Spécialité : Informatique

École doctorale : EDITE de Paris

réalisée

au Laboratoire d'Informatique de Paris 6

présentée par

Florent Coriat

pour obtenir le grade de :

Docteur de Sorbonne Université

Sujet de la thèse :

**Géolocalisation et communication
en situation de crise**

soutenue le 4 décembre 2018

devant le jury composé de :

M ^{me} Anne FLADENMULLER	Directrice de thèse
M ^{me} Luciana ARANTES	Encadrante
M. Emmanuel LOCHIN	Rapporteur
M ^{me} Aline CARNEIRO VIANA	Rapporteure
M. Sébastien MONNET	Examineur
M. Franck PETIT	Examineur

Remerciements

Ces années en thèse m’ont appris beaucoup ; des connaissances théoriques bien sûr, mais aussi sur la recherche, sur le travail en laboratoire, et sur moi. C’était une période intense, parfois éprouvante, parsemée d’imprévus et de petits bonheurs. Je voudrais ici remercier toutes les personnes qui m’ont, à un moment ou à un autre, aidé, apporté leur soutien, ou simplement contribué à égayer la vie au laboratoire.

Je voudrais d’abord remercier Anne, pour m’avoir accordé sa confiance jusqu’à la fin, malgré des moments difficiles, et pour avoir fait son possible pour que je puisse terminer cette thèse.

Je remercie aussi tout particulièrement Luciana, pour son aide infaillible à la rédaction, même dans les délais les plus courts.

Je tiens aussi à remercier Olivier, pour avoir été un enseignant exceptionnel et inspirant, et pour son soutien moral ponctuel mais efficace.

Mes remerciements à M. Emmanuel Lochin, M^{me} Aline Carneiro Viana, M. Sébastien Monnet et M. Franck Petit qui m’ont fait l’honneur d’accepter de faire partie de mon jury de thèse.

Je remercie l’équipe NPA pour m’avoir accueilli au début de ma thèse. Merci aux doctorants et anciens doctorants de l’équipe pour tous les bons moments passés au laboratoire, et en dehors.

J’adresse toute ma gratitude à l’équipe REGAL/DELYS pour m’avoir accueilli dans ma dernière année dans une ambiance chaleureuse. Ce changement d’environnement m’a donné un nouveau souffle.

Merci à ma famille pour leur soutien depuis le début de mes études. Merci à ma mère pour m’avoir toujours laissé libre de choisir ce que je voulais faire. Merci à mes frères pour m’avoir aidé à garder les pieds sur terre.

Merci enfin à Clara, pour m’avoir supporté et d’avoir toujours été là pour moi quand j’en avais besoin. Je ne peux imaginer ce qu’auraient été ces dernières années sans elle.

Table des matières

Remerciements	iii
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Description générale	3
1.3 Contributions	4
1.4 Plan du document	5
1.5 Terminologie	6
2 État de l’art	7
2.1 Géolocalisation	7
2.1.1 Localisation	7
2.1.2 Exploitation	8
2.2 Communications : l’existant	9
2.2.1 Équipements spécifiques	9
2.2.2 Équipements grand public	10
2.3 Réseaux <i>ad hoc</i>	11
2.3.1 Matériel et architectures	12
2.3.2 Problématiques du routage Routage MANET, DTN & hybride . .	12
2.3.3 Protocoles	13
2.4 Évaluation & Mobilité	14
2.4.1 Métriques d’évaluation	14
2.4.2 Modèles de mobilité pour les situations de crise	15
2.5 Graphes dynamiques	16
2.5.1 Définition	16
2.5.2 Notions usuelles	17
2.5.3 Centralité	17
2.6 Conclusion	19
3 Architecture de géolocalisation	21
3.1 Contraintes et objectifs	21
3.1.1 Hypothèses de travail	21
3.1.2 Objectifs	23

3.2	Architecture	23
3.2.1	Application	23
3.2.2	Collecte et exploitation	24
3.2.3	Interconnexion des centres de collecte	25
3.2.4	Obsolescence des données	25
3.2.5	Données de terrain	26
3.3	Mobilité	26
3.3.1	<i>Danger Movement</i>	26
3.3.2	Graphes dynamiques	29
3.4	Communications et collecte	31
3.4.1	Spécificités	31
3.4.2	Messages	32
3.4.3	Interfaces et protocoles	32
3.4.4	Métriques d'évaluation	35
3.4.5	Plateforme de test matérielle	36
4	Plateforme de simulation	39
4.1	Implémentation	39
4.1.1	The ONE	39
4.1.2	Danger Movement	41
4.1.3	Application	41
4.1.4	Simulation des interfaces	42
4.1.5	Routeur	42
4.1.6	Export des résultats	43
4.1.7	Paramètres et exécutions	43
4.2	Scénario de référence et analyse préliminaire	43
4.2.1	Généralités	45
4.2.2	Points de convergence et dispersion	46
4.3	Interfaces et protocoles : performances de collecte	48
4.3.1	Métriques	48
4.3.2	Performances de collecte	51
4.3.3	Efficacité énergétique	52
5	Résultats	57
5.1	Interfaces intermittentes	57
5.2	Mobilité	60
5.2.1	Vitesse de marche	60
5.2.2	Choix du point de convergence	62
5.2.3	Véhicules et alerte	66
5.3	Conclusion	69

6	Proportion de porteurs mobiles / statiques	71
6.1	Interfaces et protocoles	72
6.1.1	Scénario de référence	72
6.1.2	Interfaces intermittentes	76
6.2	Mobilité	78
6.2.1	Vitesse de marche	78
6.2.2	Choix du point de convergence	80
6.2.3	Véhicules et alerte	83
6.3	Conclusion	83
7	Conclusion	87
7.1	Synthèse	87
7.2	Perspectives	88
A	Résultats complets	91
B	Publications	111

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

Les catastrophes naturelles sont des événements souvent imprévisibles, qui peuvent être destructeurs, traumatisants et meurtriers. Si la France est relativement peu touchée par ces catastrophes, d'autres régions du monde sont régulièrement frappées par des séismes, tornades, inondations, incendies. Si bien que les populations concernées ont développé une véritable culture du risque : on y apprend dès le plus jeune âge les comportements à adopter pour se protéger, dans des situations auxquelles on sera sans doute confronté un jour ou l'autre. Les constructions et infrastructures sont aussi adaptées dans la mesure du possible. Les risques d'inondation par exemple, peuvent être réduits par la construction de digues ou barrages. Dans les zones où le risque est toujours présent, les plans d'urbanisation sont aménagés pour limiter la construction. Une autre approche consiste à privilégier la résilience des constructions : bâtiments sur pilotis résistants aux inondations, constructions parasismiques et paracycloniques permettent ainsi de protéger les personnes et de limiter les pertes matérielles. Pour bon nombre d'aléas météorologiques, impossibles à contenir, c'est la seule approche viable.

Aux risques naturels s'ajoutent les risques technologiques : les incidents d'exploitation de l'industrie chimique, pétrolière, minière ou nucléaire peuvent avoir des conséquences comparables aux catastrophes naturelles, et dans certains cas aggraver leurs effets. On se souvient en particulier du séisme du 11 mars 2011 dans la région du Tōhoku, au Japon. Si les constructions parasismiques ont permis de minimiser les effets du séisme, lui-même, pourtant de magnitude 9, le tsunami, conséquence directe du séisme, a fait de nombreuses victimes, provoqué des pertes économiques sans précédent et est à l'origine de la catastrophe nucléaire de Fukushima, la plus grave depuis Tchernobyl. Les risques industriels font aussi l'objet d'une attention spécifique : la construction d'habitations peut être interdite dans le voisinage de sites à risque, et des réglementations, comme la directive Seveso en Europe, imposent en amont aux exploitants industriels concernés la mise en place d'études de risques et de plans d'urgence.

Ces précautions ne sont pas toujours suffisantes, soit parce qu'elles ont été incorrectement ou insuffisamment appliquées, soit parce que l'ampleur de la catastrophe dépasse

les capacités de résilience prévues. Les populations concernées se retrouvent alors dans une situation difficile où la plupart des hypothèses habituelles sur la disponibilité des ressources – matérielles, énergétiques, etc. – et les comportements humains se retrouvent invalidées. C’est dans ce contexte que doivent intervenir, le plus rapidement possible, les équipes de secouristes.

Nous avons pu rencontrer des secouristes, échanger avec eux et assister, dans le cadre du salon du secourisme [95], à des conférences sur la gestion des situations de crise. Tous nous ont confirmé que leur priorité, dans les premiers instants après-crise, est d’évaluer la situation, l’ampleur des dégâts, de cartographier la zone sinistrée, ses risques, les ressources disponibles, ainsi que de géolocaliser les personnes présentes, victimes comme secouristes. Ceci explique aussi la présence de fonctionnalités dédiées dans la majorité des outils actuellement utilisés : comme les terminaux TETRAPOL, utilisés par les secouristes en France, capables de transmettre leurs coordonnées obtenues par GPS, ou les nombreux projets collaboratifs [100, 21, 91], qui présentent en majorité leurs informations sur des cartes partagées, etc.

Ces systèmes reposent sur les connaissances du terrain des utilisateurs (saisie manuelle) ou plus souvent sur le système GPS. En l’absence de récepteur GPS, ou si le signal est brouillé (perturbations atmosphériques, nuages naturels ou générés par la catastrophe...) les relais (fixes) de téléphonie mobile, les points d’accès Wi-Fi, voire des terminaux proches [17] peuvent être utilisés pour déterminer par trilatération une localisation, qui doit ensuite être acheminée vers un centre de secours. Or, ce genre de catastrophes entraîne souvent une détérioration importante des infrastructures réseau, et les équipements restants sont rapidement saturés par la hausse soudaine du trafic : les organismes officiels cherchent à propager les annonces d’urgence et les victimes appellent les services de secours, tandis que les rescapés tentent de localiser leurs proches et communiquer avec eux. Dans de telles situations de crise, l’établissement de canaux de communication alternatifs dès les premiers instants est un objectif stratégique crucial [67]. Ces communications peuvent permettre d’évaluer la situation, d’établir une cartographie des zones de danger, de localiser les victimes et de maintenir le contact entre les rescapés, les équipes de sauvetage, et les centres de commandement.

Il existe des solutions pour mettre en place des infrastructures réseau de secours (relais mobiles, ballons...), mais leur déploiement peut prendre plusieurs heures et leur utilisation est le plus souvent restreinte aux moyens de communication spécifiques des secouristes.

Dans ces conditions, la seule solution viable, exploitable dès les premiers instants et intéropérable, consiste à utiliser exclusivement le matériel existant, mobile : les terminaux des personnes présentes sur la zone sinistrée, équipés d’interfaces sans-fil (Wi-Fi et/ou Bluetooth). L’utilisation de terminaux mobiles pour acheminer des informations selon un modèle pair-à-pair entre des nœuds mobiles nous place dans le domaine des réseaux de type MANET et DTN.

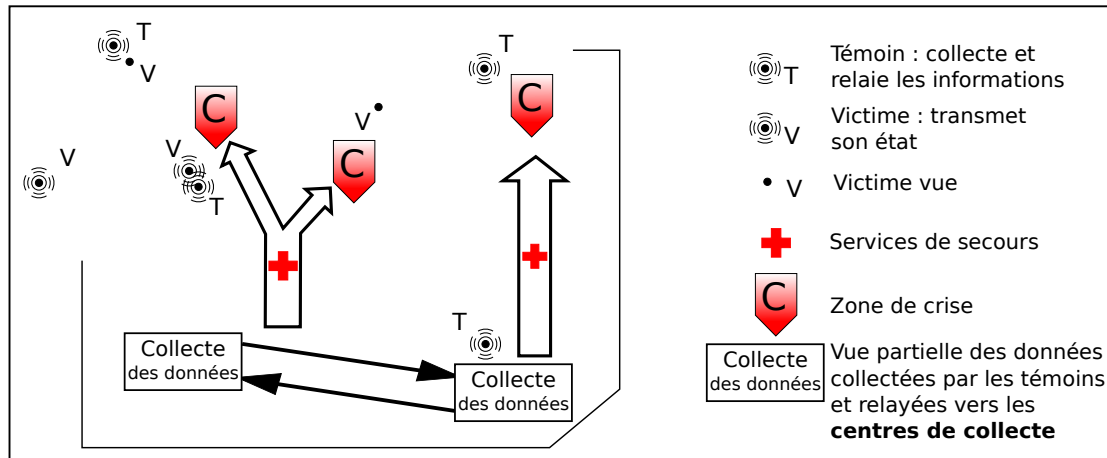


FIGURE 1.1 – Contexte de l'étude

1.2 Description générale

Nous décrivons ici les grandes lignes de notre système de communication après-crise, illustré par la figure 1.1. Nous nous sommes intéressés en particulier à la collecte d'informations de géolocalisation et de cartographie de la zone à l'intention des équipes de secours, dès les premiers instants suivant une catastrophe et dans le pire cas possible : les infrastructures de communications habituelles sont supposées totalement inopérantes.

Le déplacement des populations après une catastrophe dépend de la nature et de la gravité de l'évènement, de la configuration géographique de la zone touchée, de leur préparation à ce type de catastrophe, etc. Dans le cadre de cette thèse, nous supposons que la majorité des personnes cherchent à rejoindre des lieux particuliers, comme les gares ou aéroports, pour quitter la zone après une catastrophe de gravité modérée, ou les hôpitaux, centres de secours et autres points de regroupement après un évènement majeur. Nous nommons *points de convergence* ces points d'intérêts, identifiés et peu nombreux. Parmi ces personnes, certaines sont porteuses d'un terminal mobile exécutant une application spécifique, capable de transmettre les informations de géolocalisation. Ces *témoins* peuvent ainsi être localisés, mais aussi signaler et retransmettre la position des *victimes* : les personnes immobilisées, blessées ou piégées. Pour les victimes qui exécutent aussi l'application, les informations sont automatiquement relayées par les terminaux des témoins ; les autres peuvent être signalées manuellement par un témoin sur l'application. Les témoins peuvent aussi signaler les zones particulièrement touchées, en particulier les points où l'état des routes ne permet plus la circulation.

Toutes les données recueillies sont acheminées vers des *centres de collecte* ou *hotspots*, choisis parmi les points de convergence. À l'arrivée des équipes de secours, celles-ci y disposent alors d'informations suffisantes pour une première évaluation de la situation. Elles peuvent ainsi immédiatement organiser des missions de sauvetages en ciblant en priorité les victimes, tout en anticipant les difficultés supplémentaires dans les zones accidentées signalées.

Pour permettre cette exploitation rapide, les centres de collecte sont dotés d'équipements de communication, de traitement et de stockage, ainsi que d'une source d'énergie autonome, bien supérieurs à ceux des terminaux mobiles. Ils sont aussi interconnectés par des liaisons résilientes, ce qui leur permet de partager leurs informations, et de construire une vue commune de la zone. En dehors de ces centres, l'ensemble des communications repose sur des échanges sans-fil pair-à-pair.

L'enjeu principal est évidemment l'efficacité de la collecte des données de géolocalisation, en priorité des victimes. Mais dans ce contexte après-crise, où l'ensemble des communications repose sur des terminaux mobiles fonctionnant sur batterie et sans accès simple à d'autres alimentations électriques, l'économie d'énergie peut devenir tout aussi importante. C'est donc sur ces deux aspects que se porte notre évaluation.

1.3 Contributions

Nous proposons une architecture de collecte de données de géolocalisation et d'état, reposant principalement sur les terminaux mobiles des personnes formant un réseau *ad hoc*, avec un minimum de matériel dédié. Notre système utilise un protocole de routage DTN pour acheminer vers des centres de collecte les informations de géolocalisation les plus récentes des personnes présentes, et diffuser parmi tous les terminaux impliqués une alerte et des informations sur la positions de zones accidentées. Nous avons donc choisi et adapté les deux protocoles Epidemic [11] et Spray and Wait [24].

Les performances d'un réseau mobile *ad hoc* dépendent fortement de la mobilité des personnes. Or vu nos hypothèses, il est impossible d'effectuer des tests en situation réelle, ni même d'en reproduire les conditions. Nous avons donc développé une plateforme d'évaluation reposant sur le simulateur de réseaux opportunistes à événements discrets ONE [39]. ONE permet la simulation des communications d'un réseau mobile suivant des traces de mobilité ou de contacts pré-enregistrées, ou en simulant également les déplacements suivant un modèle de mobilité. Nous espérons au départ utiliser des traces de mobilité réelles, mesurées après des séismes ; nous n'avons finalement pas réussi à les obtenir.

Les modèles de mobilité présentés dans la littérature ou implémentés dans ONE étaient soit trop simples et génériques, soit centrés sur les secouristes, ignorant les déplacements des nombreuses personnes présentes sur la zone. Nous proposons donc un nouveau modèle de mobilité, baptisé *Danger Movement*, relativement simple mais qui prend en compte les victimes et rescapés d'une situation après-crise.

Une fois le modèle de mobilité et le système de géolocalisation implémentés sur ONE, nous définissons et sélectionnons des métriques représentatives pour en évaluer les performances. Nous menons enfin une évaluation approfondie de notre système de géolocalisation, en variant différents paramètres. D'abord des paramètres de communication classiques : interfaces sans-fil utilisées, protocole de routage. Puis nous proposons et évaluons un procédé visant à réduire la consommation énergétique sur les terminaux mobiles, en désactivant de manière pseudo-périodique leurs interfaces. Enfin, nous évaluons l'impact sur le système de paramètres de mobilité et de comportement, comme les

vitesse de déplacement, ou la présence de personnes adoptant une mobilité différente.

L'évolution au cours du temps des contacts inter-nœuds, induite par la mobilité, peut être représentée par un graphe dynamique. Ce formalisme, qui fait abstraction des détails de mobilité, fournit de nombreux outils d'analyse, qui pourraient notamment permettre d'optimiser le routage. Nous avons donc commencé en parallèle, en collaboration avec l'équipe Complex Networks, une étude sur les graphes dynamiques, afin de mieux comprendre et caractériser les motifs de contacts de chaque nœud, et de trouver des corrélations avec sa mobilité, son rôle dans le réseau, sa capacité à relayer de l'information. Ces premiers travaux se sont concentrés sur la notion de centralité dans un graphe, et sa généralisation aux graphes dynamiques.

Nous avons enfin commencé la construction d'une plateforme matérielle de test de réseau mobile *ad hoc*. Basée sur des pico-ordinateurs de type Raspberry Pi exécutant un système GNU/Linux, nous y avons implémenté les protocoles Epidemic et Spray and Wait, exécutés sur une interface Wi-Fi en mode Ad hoc ou Mesh. Ces premiers tests nous ont déjà permis de valider la faisabilité de notre système de collecte. Cette plateforme de test permettra aussi de tester des protocoles réseau, ou des algorithmes répartis, dans un environnement réaliste.

1.4 Plan du document

Cette thèse est structurée en sept chapitres. Le chapitre 2 présente un état de l'art préalable au développement de nos travaux, décrits dans les chapitres 3 à 6. Le chapitre 7 conclut la thèse.

Le chapitre 2 est un état de l'art. Y sont d'abord présentées les différentes technologies de géolocalisation utilisables selon le contexte, de la localisation par satellites à la détermination collaboratives de positions relatives en l'absence de référence absolue. Nous présentons ensuite les solutions de communications, de collecte et de partage d'informations existantes, utilisées en situation après-crise par les secouristes et les populations touchées. La section 2.3 présente les solutions de réseau *ad hoc*, permettant de se passer des infrastructures réseau – notamment si elles sont détruites ou saturées, ou en cas de défaillance du réseau de distribution électrique. L'avant-dernière section du chapitre dresse un état de l'art des modèles de mobilité, indispensables à l'évaluation par simulation des performances d'un réseau mobile, ainsi que les métriques de performances habituellement utilisées. Une rapide introduction aux graphes dynamiques et à la notion de centralité clot le chapitre.

Le chapitre 3 présente plus précisément notre système de géolocalisation. Après une description de nos hypothèses de travail et objectifs, nous présentons l'architecture matérielle et logicielle de notre solution et le modèle de mobilité *Danger Movement*, utilisé

pour les évaluations par simulation. La section 3.3.2 décrit brièvement nos travaux sur les graphes dynamiques, qui ont donné lieu à une publication conjointe [79] avec l'équipe Complex Networks. Nous précisons ensuite nos choix de protocoles de communication et les modifications apportées pour les adapter à nos objectifs de collecte. Nous proposons enfin des métriques pour l'évaluation des performances du système. La dernière section de ce chapitre présente notre prototype de plateforme de test matérielle.

Le chapitre 4 présente notre plateforme de simulation. Après une rapide description de notre implémentation sur le simulateur ONE, nous définissons notre scénario de référence, et évaluons la pertinence des métriques proposées au chapitre 3.

Ce travail a donné lieu à une publication [63]

Le chapitre 5 présente une évaluation du système suivant différentes configurations, en modifiant des paramètres de communication ou de mobilité. Ce travail a donné lieu à des publications [74, 86].

Le chapitre 6 présente une évaluation plus approfondie de notre système de géolocalisation. Dans ce chapitre, nous élargissons l'étude pour prendre en compte des situations différentes, où la nature et la gravité de la catastrophe, les instructions des autorités ou le comportement des personnes modifient la proportion de personnes qui restent immobiles.

Le chapitre 7 conclut la thèse, tout en présentant des pistes de recherche pour la poursuite du projet.

1.5 Terminologie

Dans ce document, le terme *porteur* désigne une personne munis d'un terminal mobile exécutant une application spécifique à notre système de communication. Un porteur peut être dans l'incapacité de se déplacer, ou décider de rester stationnaire ; il est alors dit *immobile* ou *statique*, assimilé à une *victime* de la catastrophe. Dans le cas contraire, le porteur est dit *mobile*.

Les porteurs mobiles se déplacent majoritairement vers des lieux connus spécifiques, les *point de convergence* (PC). Un point de convergence peut être équipé de matériel spécifique pour la collecte des informations et leur retransmission aux autres points de convergence équipés : on nomme *centre de collecte* ou *hotspot* un tel point de convergence. Inversement, un point de convergence non équipé – ou dont l'équipement est défaillant – sera qualifié de *passif* ou *inactif*.

Chapitre 2

État de l’art

2.1 Géolocalisation

La géolocalisation des personnes par les services de secours en contexte après-crise peut présenter deux difficultés. La première est la localisation elle-même : à moins de laisser chaque utilisateur entrer manuellement sa position, et éventuellement celles d’autres personnes, il est nécessaire de disposer sur chaque terminal d’un moyen automatique de déterminer sa propre position. La seconde est évidemment la transmission de l’information et sa mise à la disposition des secouristes.

2.1.1 Localisation

Les solutions existantes reposent sur les connaissances du terrain des utilisateurs (saisie manuelle) ou plus souvent sur une technologie de positionnement fournie par le terminal. Les terminaux mobiles actuels proposent couramment deux méthodes de localisation.

Cell-ID La localisation par trilatération¹ repose sur les relais mobiles GSM et/ou points d’accès Wi-Fi. À partir d’une base de données publiques d’antennes géolocalisées, et à condition de se trouver à portée de signal d’au moins trois des relais répertoriés, il est possible de déterminer sa propre position. Des études sont régulièrement réalisées pour évaluer les performances de ces techniques, améliorer leur précision et réduire leur consommation énergétique [22, 48, 72].

Satellites La localisation par satellites, comme le GPS (*Global Positioning System*, ou le GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) repose aussi sur des techniques de trilatération, cette fois à partir de satellites dédiés. Chaque satellite émet régulièrement un signal contenant son heure d’émission (afin de pouvoir calculer les temps de propagation relatifs entre les satellites et le récepteur) ainsi que des informations sur sa position et

1. Souvent dénommée improprement « triangulation ».

sa trajectoire. Ces informations permettent de localiser le récepteur avec une précision de l'ordre de 10 m, selon le nombre de satellites « visibles ».

La précision, la vitesse et la consommation d'un système de géolocalisation par satellite peut être amélioré par des services au sol fournissant des informations supplémentaires [33], ou en combinant géolocalisation par satellites et géolocalisation par relais de téléphonie et points d'accès Wi-Fi.

Une catastrophe naturelle par exemple, est susceptible de perturber ces deux systèmes. Les relais mobiles peuvent avoir été détruits, ou leur alimentation électrique coupée. De plus, la localisation par relais nécessite d'accéder à une base de données, généralement fournie par un service distant, inaccessible si les infrastructures réseau sont touchées.

Des conditions atmosphériques extrêmes, ou un nuage de particules en suspension par exemple, peuvent aussi perturber les signaux GPS. Plus simplement, les terminaux mobiles ne sont pas nécessairement tous équipés d'un récepteur GPS.

Dans ces conditions, il reste possible de déterminer sa position, au moins relative, par trilatération à partir d'éventuels points d'accès Wi-Fi toujours actifs, ou même des terminaux proches [12, 15, 17]. Les informations obtenues peuvent être moins précises et plus difficiles à exploiter, mais ces systèmes restent utilisables même en cas de défaillance des infrastructures et de perturbations atmosphériques, et sont ainsi adaptés aux conditions extrêmes des situations de crise.

2.1.2 Exploitation

Les données acquises doivent ensuite être mise à disposition des secouristes et éventuellement du public. Les services de localisation actuellement utilisés centralisent les données sur un ou plusieurs serveurs, accessibles *via* les infrastructures classiques. Il serait aussi possible de publier ces informations sur un *service de géolocalisation* réparti, comme *Grid Location's Service* (GLS) [10] ou son successeur MLS [27], ou encore GPLS [60] ou PETAL [82]. Ces services répliquent géographiquement des informations de position et de vitesse entre plusieurs nœuds présents sur la zone, routent chaque requête de position vers le nœud concerné, et la réponse en sens inverse. Comme l'ont montré les tests en simulation, ces quatre services passent bien à l'échelle, même avec des nœuds se déplaçant rapidement. Mais ces systèmes ont été conçus pour fonctionner sur un réseau dynamique dense (type MANET), avec des communications à latence relativement faibles et une mobilité limitée.

De plus, le modèle requête-réponse induit un surcoût dans la collecte d'information : dans un scénario où des nœuds connus – les secouristes – collectent toutes les données, la construction de la structure de stockage répartie et la transmission de requêtes explicites ralentissent le processus.

Un tel service pourrait être utile dans un second temps, notamment pour mettre l'information à disposition du public.

2.2 Communications : l'existant

De nombreuses technologies ont été développées et déployées pour permettre la communication et parfois la géolocalisation des personnes en situation de crise. Nous proposons ici un aperçu de la situation avec les technologies actuellement utilisées ou expérimentées en France ou dans le monde.

2.2.1 Équipements spécifiques

Professionnels du secourisme : infrastructure centralisée

Les secouristes disposent habituellement pour leurs communications d'une infrastructure réseau maillée dédiée et indépendante de type PMR², comme l'Infrastructure Nationale Partagée des Transmissions (INPT) [26] en France, complétée si nécessaire par des téléphones satellitaires. L'INPT exploite la norme TETRAPOL [98], qui définit un protocole de communication numérique chiffré pour le transport de la voix et la transmission de données (messages, statut, géolocalisation, appel de détresse). Les normes TETRA³ [97] et P25 [96], sensiblement équivalentes quoiqu'un peu plus récentes, sont surtout utilisées à l'étranger, ou localement en France par des opérateurs publics ou privés.

Ces protocoles supportent des communications centralisées sur l'infrastructure (mode relayé), l'utilisation de relais indépendants portables (RIP) éventuellement équipés d'une parabole pour la liaison satellite, et un mode direct (point à point). Cette architecture souffre de plusieurs limitations [32] :

- orientée voix avec connexion, elle est peu adaptée aux données (débit faible) et le nombre de connexions est limité ;
- inaccessible au grand public : l'INPT est réservé aux professionnels du secourisme ;
- pas de routage *ad hoc* : hors couverture (ou si l'infrastructure est endommagée), des RIP ou des répéteurs doivent être mis en place.

Les RIP permettent d'établir une cellule indépendante, mais déconnectée de l'infrastructure principale. Au contraire, les répéteurs permettent d'agrandir la zone de couverture, mais les données sont alors diffusées sans restriction – ni contrôle de collision / congestion – sur toute la zone. Ce fonctionnement ne passerait pas à l'échelle et serait ainsi inapplicable aux communications génériques (voix et données) pour le grand public.

Matériel temporaire dédié

L'infrastructure publique au contraire, est conçue pour supporter une charge importante, avec de nombreux utilisateurs, et est aussi utilisée en complément par les secouristes [50]. En situation de crise, elle peut toutefois être endommagée, surchargée, ou simplement ne pas couvrir la zone sinistrée. Des solutions matérielles ont donc été

2. Private Mobile Radiocommunications

3. Terrestrial Trunked Radio

développées pour compléter ou rétablir rapidement le fonctionnement des infrastructures publiques sur une zone donnée. Des stations radio mobiles – sur camions (*Cell on Truck*) ou camionnettes (*Cell on Wheels*) –, utilisées en temps normal pour des installations réseau temporaires en complément de l'infrastructure permanente, peuvent être déployées en cas de crise. Connectées au réseau câblé, par antenne parabolique, par satellite, ou *via* un réseau de ballons gonflés à l'hélium, comme le propose le projet Loon [93], elles permettent de rétablir une couverture réseau.

2.2.2 Équipements grand public

Les équipements de communication publics permettent d'impliquer toutes les personnes présentes dans la collecte, le traitement, la transmission et la diffusion des informations utiles aux secouristes comme aux victimes, aux rescapés et à leurs proches. C'est un atout indéniable dans une situation où une masse d'informations, potentiellement vitales, doit être analysée, filtrée et distribuée rapidement aux services et personnes concernées.

Applications & décentralisation des sources (crowdsourcing)

Ces dernières années, suite à différentes catastrophes, ont ainsi émergé de nombreux projets pour compléter les communications de crise habituelles et parer leurs limites, notamment en incluant le grand public. Après le séisme de 2011 au Japon par exemple, plus de 150 applications, plus ou moins spécialisées, ont été développées [47] pour faire face aux conséquences de la catastrophe.

La plupart de ces applications reposent sur le crowdsourcing pour fournir aux victimes, aux secouristes et/ou aux autorités des informations sur la situation, les risques, les besoins, la localisation des ressources et des personnes, etc. Ushahidi [100], Sahana Eden [21], Google Crisis Response [91], UbAlert Disaster Alert Network [89], People Locator [53], First Response [80], ou le système de gestion après crise présenté dans [81] mettent ainsi à disposition de tous des cartes collaboratives en ligne, où peuvent être placées ces informations. Les applications de la Croix Rouge [75, 87] quant à elles diffusent des informations et messages de prévention et d'aide adaptés aux différents types de catastrophes. On peut aussi mentionner le très médiatisé contrôle d'absence de danger (*Safety Check*) de Facebook, qui permet simplement aux personnes présentes sur une zone sinistrée de se signaler « en sécurité ».

Ces solutions prennent la forme de sites web ou d'applications mobiles. Même si certaines permettent l'utilisation d'autres canaux – comme Ushahidi, qui permet la collecte d'informations par SMS/MMS –, toutes reposent sur les infrastructures classiques pour leurs communications.

Décentralisation des communications

Dans le cas où l'infrastructure serait insuffisante ou endommagée, ce type d'applications resterait inutilisable jusqu'au rétablissement de communications. Or le déploiement

d'infrastructures de communications dédiées ou d'équipements supplémentaires complétant les infrastructures usuelles peut prendre du temps, en particulier dans un contexte après-crise : une catastrophe ou ses effets peuvent rendre les voies d'accès terrestres, maritimes et/ou aériennes impraticables, empêchant ainsi l'acheminement des équipements nécessaires.

De plus, ces équipements sont coûteux – plusieurs dizaines de milliers d'euros par cellule et leur usage réglementé. Seuls des gouvernements et/ou des groupes industriels peuvent prendre l'initiative de ces installations.

Pour réduire les délais de rétablissement des communications, il est donc indispensable de fournir aux populations présentes des outils capables de maintenir des communications indépendamment des infrastructures. D'autres projets visent ainsi à développer des solutions logicielles capables de décentraliser les communications pour résister à une défaillance du réseau, comme Twimight [44] (« Twitter in disaster mode »), un client Twitter utilisable hors connexion internet, en diffusant des tweets de terminal à terminal, ou encore FireChat[90]. FireChat est une application de messagerie fonctionnant avec ou sans connexion internet : un réseau maillé est construit en exploitant les interfaces Wi-Fi et Bluetooth, et chaque message peut être transmis ou diffusé selon le modèle store-carry-forward sur tout lien disponible. On peut aussi mentionner le projet Serval [99], qui développe une application expérimentale capable de transmettre des données de toutes sortes (messages, cartes, voix, photos...) sur un réseau maillé *ad hoc*.

La plupart de ces projets ne visent pas spécifiquement les situations de crise, mais plus généralement les régions ou situations où la couverture réseau est inexistante ou insuffisante (pays en développement...) ou encore où le réseau ne peut être utilisé librement (surveillance, censure...). FireChat a par exemple été utilisé à Taïwan [65], en Thaïlande [61], et à Hongkong [64] pour contourner la censure et les coupures de l'internet.

2.3 Réseaux *ad hoc*

Les stations radio mobiles, actuellement utilisées pour rétablir une couverture réseau, sont des équipements coûteux, placés selon les besoins et dépendants pour certains du réseau électrique. S'ils ne sont pas déjà présents, ou si la catastrophe a provoqué une coupure de courant, leur déploiement (ou remise en service) peut prendre de quelques heures à plusieurs jours, faisant perdre un temps précieux aux secours et aux victimes. Des solutions alternatives, rapidement opérationnelles et autonomes, peuvent donc s'avérer utiles, au moins dans les premiers instants suivant la catastrophe. Les auteurs de [78] recommandent ainsi, pour la conception d'un système de communication après-crise, d'éviter toute approche centralisée – le point central pouvant être défaillant –, et de développer plutôt une solution utilisable sur smartphones dès les premiers instants, reposant sur des standardsinteropérables, et capable de fonctionner en cas de coupure de courant.

C'est pourquoi l'utilisation de réseaux *ad hoc*, sous différentes formes, est envisagée pour les communications après-crise. Les réseaux *ad hoc* sont des réseaux capables de s'organiser et de fonctionner sans infrastructures : chaque nœud est un routeur pour

les paquets du réseau. Dans un réseau *ad hoc* mobile en particulier, ces nœuds sont en mouvement et établissent des liens plus ou moins éphémères de manière opportuniste.

2.3.1 Matériel et architectures

Les réseaux *ad hoc* mobiles sont étudiés sous les noms de MANET (Mobile Ad-hoc NETwork⁴) pour les réseaux dynamiques connexes, ou DTN (Delay/Disruption Tolerant Network) lorsque la connexité ne fait pas partie des hypothèses de travail. Les VANET (Vehicular Ad-hoc NETwork) sont une catégorie particulière de DTN, appliqués spécifiquement aux véhicules, qui présentent une mobilité plus rapide mais plus prévisible.

Comme nous le verrons, nos hypothèses de travail nous placent dans le cadre général des DTN.

Les nœuds considérés dans un réseau *ad hoc* peuvent être des terminaux mobiles de piétons, des équipements spécialisés embarqués dans des véhicules, des relais fixe, etc. [62] propose une classification de ces équipements et des architectures qui résultent de leur utilisation en DTN.

Les équipements existants (stations mobiles, relais satellites...) peuvent être inclus dans le réseau DTN, mais son intérêt réside dans la possibilité d'utiliser des équipements non spécialisés, moins coûteux, à ressources limitées mais déployables plus rapidement – voire déjà présents sur la zone. Aux terminaux mobiles des personnes présentes peuvent ainsi s'ajouter des équipements simples comme des throwbox.

Les throwbox [28] sont des relais fixes, compacts et auto-alimentés placés sur la zone dès les premiers instants, voire avant la crise : leur faible coût et leur encombrement réduit permet d'envisager un déploiement préventif. Elles n'offrent pas la connectivité internet (pas de liaison satellite, etc.) qu'une station mobile permet, mais leur utilisation permet d'améliorer les performances d'un DTN. Les throwbox présentent une solution intéressante et activement étudiée : on cherche à optimiser leur architecture matérielle, leurs interfaces, les protocoles utilisés, leur placement, etc. [29, 85]

2.3.2 Problématiques du routage Routage MANET, DTN & hybride

La variabilité de la topologie d'un réseau mobile *ad hoc* rend les algorithmes de routage classiques (i.e. de la couche IP) inefficaces : trop lents pour s'adapter efficacement à des changements aussi fréquents, ils s'appuient de plus sur un système d'identification/adressage corrélé, par construction, à la topologie. Les terminaux mobiles imposent aussi leurs limites propres en capacité de stockage, capacité de traitement et autonomie. La capacité de chaque lien est aussi limitée, – et impossible à prévoir dans le cas général – par la durée de contact et les interférences. Ces contraintes sont à prendre en compte pour les décisions de transmission (qui consomment de l'énergie et occupent les liens) et dans la gestion des buffers et des informations de routage.

Tout protocole de routage pour réseau mobile opportuniste doit avant tout être capable d'identifier ses voisins, détecter l'arrivée de nouveaux nœuds à portée de signal et

4. Initialement le nom du groupe de travail de l'IETF, « MANET » désigne maintenant leur sujet d'étude.

la disparition d'anciens voisins. Cette découverte de voisinage repose essentiellement sur l'émission périodique de trames balises (beacon), éventuellement optimisée pour réduire le nombre d'envois ou y intégrer des données supplémentaires. Elle peut être implémentée par le protocole de routage lui-même [58, 9], ou par un protocole de couche inférieure, lié à l'interface utilisée.

MANET Le routage dans un MANET se heurte de plus au problème de l'obtention, du maintien, de la mise à jour et de l'exploitation, sur chaque nœud (et dans un espace de stockage limité) d'informations utiles à l'établissement de routes dans un réseau où les identifiants sont indépendants de la topologie et où tout lien peut être rompu à tout moment.

DTN Dans un DTN, la notion habituelle de route n'existe pas. Un paquet doit pouvoir être transmis de proche en proche selon le modèle *store-and-forward* ou *store-carry-forward* : un paquet peut être conservé un certain temps par chaque nœud, et éventuellement déplacé physiquement (« porté ») avant d'être retransmis. Le protocole de routage doit alors maximiser la probabilité que le paquet – ou l'une de ses copies – arrive à bon port, tout en limitant la transmission sur le réseau de copies inutiles d'un même paquet. Ces répliques, rendues nécessaires par le manque de connectivité, peuvent en effet surcharger les liens et tampons et sont couteuses en énergie.

La définition d'un protocole de routage sur DTN doit donc essentiellement, en prenant en compte ces contraintes, répondre à deux questions :

- Lors d'une rencontre entre deux nœuds, quels messages doivent être échangés (et avec quelle priorité) ?
- Quand la file de messages est pleine, quel message supprimer ?

Hybride Certains protocoles de routage dits « hybrides » utilisent des techniques de routage en MANET pour optimiser la transmission de données dans les composantes connexes d'un DTN [57].

2.3.3 Protocoles

De nombreux protocoles ont été développés pour les DTN, et évalués sur différentes architectures (terminaux uniquement, throwbox, relais fixes, équipements de routage fixes ou mobiles, etc.) [62]. Des protocoles « simples » comme First Contact [39], Epidemic [11] ou Spray and Wait [24], ne s'appuient sur aucune hypothèse ni aucune mesure de la structure du réseau. Ils sont souvent utilisés comme référence dans les études comparatives, quel que soit le contexte.

D'autres protocoles s'appuient sur l'historique des rencontres (Spray and Focus [31], PRoPHET [20], MaxProp [25]), ou sur les caractéristiques imposées de modèles de mobilité spécifiques (Time To Return [45]) pour estimer les probabilités de rencontre futures des nœuds. Ces protocoles supposent une certaine redondance des contacts. En particulier, un nœud S ne peut router efficacement un message vers un nœud D que si S

connaît D , c.-à-d. si un paquet (applicatif ou de contrôle) a déjà suivi un chemin de D à S – et si ce chemin existe encore, au moins en partie. Dans le cas contraire, ces protocoles se comportent au mieux comme les protocoles « simples ». Or les messages de géolocalisation de notre scénario sont en grande majorité dans ce cas.

Restent enfin les protocoles de routage géographique : la position du destinataire étant connue, les décisions de routage peuvent s'appuyer sur la position des nœuds voisins, leur vitesse, voire une estimation de leurs déplacements futurs.

Ces protocoles font régulièrement l'objet de tests et comparatifs sous divers scénarios, plus ou moins généralistes. Ces évaluations s'intéressent à la transmission de données volumineuses, générées aléatoirement par une source aléatoire, à l'attention d'un destinataire aléatoire. Au contraire, notre scénario suppose la transmission de messages de taille modeste – des données de géolocalisation –, et dont la génération suit une logique bien définie, liée au scénario lui-même.

2.4 Évaluation & Mobilité

2.4.1 Métriques d'évaluation

Avant d'aborder les protocoles *ad hoc* et leurs performances, il convient de présenter les métriques couramment utilisées pour évaluer un réseau mobile *ad hoc*. La première caractéristique évaluée est la capacité à délivrer les messages, le plus souvent mesurée par l'une des métriques suivantes :

Packet Delivery Fraction (PDF) [43] ou Message delivery ability [20] Proportion des messages applicatifs reçus par leur destinataire.

Packet Delivery Success Rate (PDSR) Proportion des messages applicatifs *routeables* reçus par leur destinataire.

Throughput [4, 56] Débit *total* moyen de réception par les nœuds destinataires, messages applicatifs et de contrôle confondus.

On mesure ensuite généralement la surcharge (overhead) de routage, pour évaluer l'*efficacité* du protocole en terme de consommation énergétique et d'utilisation de la bande passante :

Normalised Routing Load (NRL) [43] ou relative transmission overhead [37] Nombre moyen de paquets transmis sur les liens par message applicatif délivré

Overhead Nombre moyen de paquets *supplémentaires* transmis par message applicatif délivré [56], ou nombre de paquets de contrôle [6, 4]

Energy cost per message [56] Nombre moyen de paquets transmis par message applicatif émis

La consommation énergétique peut aussi être mesurée plus globalement sur la durée d'un scénario, indépendamment du nombre de messages applicatifs délivrés :

Energy Consumption [49, 62, 70] Consommation moyenne (en joules) d'un nœud

Number of message exchanges [20] Nombre total de paquets échangés

Control Message Overhead Nombre de paquets de contrôle transmis [49]

Enfin, le temps de transmission peut aussi être une mesure intéressante :

Average end-to-end delay (E2E) [43] ou Message Delivery Delay [20] Délai moyen de transmission (en secondes) d'un message applicatif délivré

Path Length [4] Nombre de sauts supplémentaires par rapport à une route optimale pour chaque message délivré, en moyenne.

Comme nous le verrons au chapitre/section 3.4.4, les contraintes de notre scénario nous ont amenés à définir de nouvelles métriques plus spécifiques.

2.4.2 Modèles de mobilité pour les situations de crise

L'utilisation de réseaux MANET ou DTN en situation de crise a déjà été proposée [14, 16]. Plusieurs études ont comparé des protocoles connus, sur des scénarios de crise [43, 46, 57, 56, 66, 62], ou dans la vie de tous les jours [6, 20, 42]), démontrant l'impact de la mobilité sur leurs performances. Des modèles de mobilités ont ainsi été proposés, implémentés et utilisés pour évaluer les protocoles.

Random WayPoint (RWP) [3], par exemple, est un modèle simple et généraliste. Chaque nœud choisit une destination D et une vitesse aléatoires, se déplace en ligne droite à vitesse constante jusqu'à D , puis marque une pause aléatoire et recommence. Il existe des variantes dans lesquelles les mouvements sont contraints sur une carte (comme le Map-Based Mobility Model de The ONE) ou par des obstacles.

Malgré son manque de réalisme [19], RWP est souvent utilisé tel quel pour des évaluations simples [66] ou non spécifiques aux scénarios de crise [9], ou plus souvent comme référence ou comme sous-modèle d'un modèle plus spécifique. [62] s'appuie sur le scénario des inondations d'Uttarakhand (Inde, 2013, 4 jours de pluie intense, 4200 villages touchés, 5700 morts) pour comparer des protocoles de routage DTN. Leurs performances sont comparées sur The ONE, sur les modèles RWP, Map Based, Cluster Movement et Post Disaster Mobility (PDM) [40]. Ces deux derniers, plus spécialisés que RWP et Map Based, les utilisent toutefois comme sous-modèles.

PDM par exemple, attribue aux nœuds, selon leur rôle, des schémas de mobilité différents : ronde, exploration, allers-retours... Certains de ces schémas sont basés sur RWP. On retrouve aussi PDM dans le scénario de test de [69], qui s'intéresse au problème d'interpolation de la position de nœuds mobiles en situation de crise.

[56] et [59] choisissent Disaster Area (DA) ; le premier pour comparer des protocoles de routage DTN, le second pour évaluer un algorithme de diffusion, et l'optimiser selon un algorithme génétique. DA ne définit que deux rôles, mais ajoute la notion de zones reflétant l'organisation des structures déployées par les secours. Le rôle « piéton » répond à une mobilité RWP avec obstacles restreinte à une zone, les « véhicules » font des allers-retours entre deux zones.

On peut aussi mentionner les modèles de mobilité spécialisés CORPS [35], Dispatched Ambulance, Reference Point Group Mobility (RPGM) [5], Human Behaviour for Disaster Areas (HBDA) [54]... Tous ces modèles sont centrés sur la mobilité des équipes de secours, et négligent les déplacements des nombreuses autres personnes présentes [73].

Les victimes ou rescapés y sont représentés en petit nombre, voire ignorés, et/ou suivent un modèle généraliste simple (RWP ou similaire).

Pour cette thèse, nous avons développé le modèle *Danger Movement*, présenté en section 3.3 qui se concentre sur les mouvements des victimes et rescapés dans les premières heures suivant une catastrophe.

2.5 Graphes dynamiques

Les connexions et déconnexions dans un réseau mobile, et en particulier dans un DTN, peuvent être modélisées par un *graphe dynamique*, ou *graphe évolutif* [51]. Les graphes dynamiques étendent la notion de graphe, largement utilisée pour la modélisation de réseaux fixes, en permettant l'apparition et la disparition d'arcs ou arêtes au cours du temps. La modélisation d'un réseau mobile sous cette forme permet d'exploiter les nombreux outils d'analyse de la théorie des graphes – en particulier des graphes dynamiques –, et peut ainsi permettre d'inférer des données de contacts des informations utiles pour le routage des messages dans le réseau.

Cette section présente brièvement les problématiques spécifiques aux graphes dynamiques, ainsi que la notion de centralité, déjà utilisée sous certaines formes pour optimiser des protocoles de routage, et que nous tentons d'adapter à notre cadre de travail.

2.5.1 Définition

Un graphe G *classique*, statique, est défini par un couple (V, E) , où V est l'ensemble de ses sommets, E l'ensemble de ses arcs ou arêtes : les éléments de E peuvent être des couples de sommets, appelés arcs – le graphe est alors dit *orienté* –, ou des paires de sommets, appelées arêtes – pour un graphe non orienté. Selon le contexte, les sommets, arcs ou arêtes peuvent être *étiquetés* : une fonction associe aux éléments concernés des étiquettes, souvent pour représenter une caractéristique particulière. Pour les graphes dynamiques, plusieurs formalismes plus ou moins équivalents ont été définis, correspondant à des conceptions et des représentations différentes. Un graphe dynamique peut ainsi être modélisé comme une suite de graphes ordonnée chronologiquement, un graphe dont chaque arête est étiquetée par l'ensemble de ses instants de présence, en remplaçant l'ensemble E par une suite de créations et destructions d'arêtes, ou encore en ajoutant une fonction de présence à valeurs dans $0, 1$, qui indique pour chaque arête e , à chaque instant, si e est présente. Les graphes, et en particulier les graphes dynamiques, sont souvent utilisés pour représenter des réseaux sur lesquels s'effectuent des déplacements ou des transferts (d'objets, de véhicules, d'informations). Il est alors courant d'étiqueter les arcs ou arêtes par leur *temps de traversée* ; dans le cas contraire, celui-ci peut être considéré comme nul (autorisant la traversée de plusieurs arcs instantanément) ou constant.

Les Time Varying Graphs (TVG) [41] unifient ces différents modèles en proposant une définition suffisamment expressive pour représenter tous les cas. Les différentes modélisations peuvent cependant, selon le contexte et l'implémentation, être plus adaptées

pour représenter concrètement un graphe ; par exemple parce que les données sont plus facilement disponibles sous une certaine forme, ou parce qu'un algorithme utilisé a été conçu pour consommer les données sous cette forme. Un algorithme analysant un réseau en temps réel par exemple, recevra les données progressivement sous forme d'un *flot de liens* (link stream) : une suite d'arcs ou arêtes, par ordre chronologique.

2.5.2 Notions usuelles

Si les notions de chemin, degré, connexité, centralité, etc. bénéficient pour les graphes « classiques » de définitions bien définies et acceptées, leurs équivalentes dynamiques, étudiées plus récemment, sont plus délicates à définir. De nombreux auteurs ont déjà travaillé à généraliser aux graphes dynamiques ces notions courantes ; du fait de la complexité des graphes dynamiques, ces généralisations donnent le plus souvent plusieurs définitions, non équivalentes, de notions proches. Les auteurs de [casteigts_time_2010] définissent ainsi pas moins de 13 classes de connexité pour les graphes dynamiques.

Par exemple, la notion de plus court chemin, bien définie dans un graphe, n'a pas d'équivalent universel et unique dans un graphe dynamique ; la définition même d'un chemin est différente. Dans un graphe, un chemin d'un sommet a à un sommet b est une suite $(u_i)_{0 \leq i \leq N}$ de sommets telle que

$$\begin{aligned} u_0 &= a, u_N = b \\ \forall i \in \llbracket 0 ; N \rrbracket, (u_i, u_{i+1}) &\in E \end{aligned}$$

Dans un graphe dynamique, la notion intuitive de chemin dépend du temps : un arc ne peut-être emprunté à un instant t que s'il existe à cet instant, ce qui peut empêcher ou retarder le déplacement. Si les arcs sont étiquetés par un temps de traversée, celui-ci s'ajoute aussi au temps, ce qui a un impact direct sur les possibilités de déplacement ultérieurs. Ceci implique notamment que les déplacements possibles dépendent de l'instant de départ. La notion de *trajet* (journey) [18] exprime ces spécificités.

Même avec cette définition, la généralisation de la notion de plus court chemin n'est pas immédiate. Dans un graphe, la longueur d'un chemin est le nombre de sauts (arcs/arêtes traversés) ou, le cas échéant, la somme de leurs poids, définis par leurs étiquettes. La longueur d'un trajet peut aussi être définie naturellement comme le nombre de saut, ou le temps écoulé entre le premier saut et la date d'arrivée. La minimisation de ces paramètres donne respectivement les *plus courts trajets* (shortest) et les *plus rapides* (fastest). Mais d'autres paramètres peuvent présenter un intérêt, comme le temps écoulé entre la date de départ et la date d'arrivée : on définit ainsi les trajets *au plus tôt* (foremost journey).

2.5.3 Centralité

La centralité d'un sommet dans un graphe est une notion intuitive, sans définition formelle, censée représenter son caractère *central* dans le réseau représenté, dans un certain contexte. On peut par exemple considérer comme central un sommet bien placé

pour relayer les messages échangés entre les sommets. De nombreuses définitions ont été proposées pour mesurer la centralité des sommets : la centralité de degré, qui mesure simplement le degré de chaque sommet, la closeness centrality [1], basée sur la distance (dans le graphe) aux autres sommets, la centralité PageRank [7] utilisée par le moteur de recherche Google, ou encore la betweenness centrality [2] et ses variantes, qui visent à mesurer la qualité des nœuds en tant qu'intermédiaires dans la transmission d'informations en analysant les plus courts chemins entre nœuds du graphes.

Ces mesures de centralité sont notamment utilisées dans certains protocoles de routage DTN [71]. SimBet [30] par exemple, associe l'ego-betweenness centrality – une variante locale de la betweenness centrality – à une mesure de similarité entre les nœuds pour identifier les bons relais. BubbleRap [36] repose pour cela sur une mesure de centralité dérivée de la simulation d'une transmission de messages par inondation. Ces protocoles exploitent généralement des mesures de centralité pour graphes non-dynamiques, appliquées sur l'historique des contacts ; ils nécessitent alors une période d'initialisation, et s'adaptent lentement aux changements liés à la mobilité des nœuds.

La betweenness centrality semble la plus adaptée à nos problématiques de routage des données – ce qu'ont confirmé nos premiers tests. Dans sa définition originale, la betweenness centrality d'un nœud e dans un graphe orienté (non dynamique) mesure, pour chaque couple de nœuds (i, j) , le nombre $g_{ij}(e)$ des plus courts chemins de i à j passant par e , par rapport au nombre total g_{ij} des plus courts chemins de i à j . La betweenness centrality de e est alors définie comme

$$C(e) = \sum_{(i,j) \in V^2} \frac{g_{ij}(e)}{g_{ij}}$$

Cette définition suppose une connaissance complète du graphe, ce qui est difficilement réalisable dans le cas d'une exécution en temps réel pour un protocole de routage. C'est pourquoi SimBet utilise l'ego-betweenness centrality : l'*ego-graph* d'un sommet e dans le graphe est défini comme le sous-graphe induit par e et ses sommets adjacents. L'ego-betweenness centrality de e est sa betweenness centrality dans son ego-network ; elle peut ainsi être calculée rapidement, à partir d'une vue partielle du graphe. Bien qu'assez éloignée *a priori* de la définition initiale de la betweenness centrality, des tests sur différents graphes ont montré que l'ego-betweenness centrality peut en donner une bonne approximation [23].

Ces mesures s'appliquent à un graphe statique, et ne sont donc pas adaptées aux réseaux DTN, où les nœuds centraux peuvent, en se déplaçant, perdre leur caractère central voire s'isoler, et inversement ; et ce quelle que soit la mesure de centralité considérée. Une première approche consiste à choisir un pas de temps t et à agréger les contacts sur chaque intervalle de temps de durée t . Cette agrégation produit une suite d'instantanés (snapshot) sur lesquels les mesures classiques peuvent être appliquées [76]. Cette approche induit cependant une perte d'information : l'agrégation fait apparaître comme simultanés des contacts qui sont en réalité ordonnés ; certains des chemins considérés

dans le snapshot ne correspondent alors à aucun trajet valide dans le graphe dynamique d'origine. Cet effet dépend principalement du choix du pas de temps t : un pas plus court permettrait de limiter la formation de chemins irréalistes. Mais ce pas définit aussi la durée maximale des trajets considérés dans les calculs de centralité ; le réduire revient à ignorer les trajets les plus longs, au risque d'obtenir des instantanés à très faible connectivité.

Une autre approche consiste à adapter les mesures de centralité aux spécificités du graphe dynamique : plusieurs définitions dérivées de la *betweenness centrality* et reposant sur une notion de trajet ont ainsi été proposées [52, 77].

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes solutions de communication et de partage d'information pour les situations de crise. Les systèmes de géolocalisation existants peuvent permettre à chaque terminal de connaître sa propre position même dans les pires situations, à partir de satellites dédiés, d'antennes-relais proches, ou même, de manière collaborative, à partir des terminaux voisins.

De nombreux services exploitent ces informations pour construire des cartes de la zone et ainsi fournir une vue à la fois globale et détaillée de la situation aux secouristes. Cependant, ces services reposent le plus souvent pour l'acheminement des données sur les infrastructures de communication centralisées, qui peuvent être défaillantes. Nous avons donc présenté les technologies de réseaux *ad hoc*, qui répondent à cette problématique, et les différentes catégories de protocoles sur lesquels ils reposent.

Nous avons enfin présenté des outils nécessaires à l'évaluation et à l'analyse d'un système de communication reposant sur un réseau mobile. De nombreux modèles de mobilité, génériques ou spécifiques aux situations de crise, ont été proposés. Néanmoins, aucun des modèles trouvés dans la littérature n'a été conçu pour représenter avec une mobilité spécifique l'ensemble des personnes présentes dans les premiers instants après une catastrophe sur la zone touchée. Nous avons aussi listé les métriques d'évaluation habituellement utilisées pour tester les protocoles de routage *ad hoc* ; ces métriques ne sont cependant pas adaptées aux objectifs spécifiques de la collecte d'information de géolocalisation. Enfin, nous avons présenté les graphes dynamiques, qui permettent de modéliser un réseau mobile tout en fournissant de nombreux outils d'analyse. La notion de centralité, qui pourrait permettre de caractériser les porteurs afin d'optimiser le routage, a notamment été définie et discutée.

Chapitre 3

Architecture pour la collecte d'informations de géolocalisation

Nous présentons dans ce chapitre notre système de collecte pour la géolocalisation. Nous précisons dans un premier temps notre cadre de travail et nos hypothèses sur la situation, le comportement des personnes impliquées et les ressources matérielles disponibles, ainsi que nos objectifs pour le système développé.

Nous définissons ensuite (section 3.2) l'architecture globale de notre solution avant de détailler notre modèle de mobilité (section 3.3), développé en concordance avec nos hypothèses. La dernière section de ce chapitre présente le système de collecte lui-même (section 3.4), nos propositions de métriques pour son évaluation, et, brièvement, notre plateforme matérielle développée pour valider la faisabilité du système.

3.1 Contraintes et objectifs

Une catastrophe, quelle que soit son ampleur, peut avoir un impact significatif et difficilement prévisible tant sur le fonctionnement des infrastructures que sur les comportements des personnes présentes. Nous présentons ici nos objectifs et hypothèses de travail pour la conception et l'évaluation d'un système de géolocalisation des personnes en de telles situations de crise.

3.1.1 Hypothèses de travail

Environnement L'étude porte sur une zone à l'échelle d'une ville, touchée par une catastrophe, naturelle – séisme, ouragan, inondation, incendie, éruption volcanique, tsunami... –, ou humaine – incident industriel, attentat, guerre... détruit une partie des constructions et infrastructures (distribution d'eau, énergies, communications, routes). Les dommages causés peuvent être accompagnés ou suivis de pertes humaines.

Nous nous intéressons en particulier aux toutes premières heures qui suivent la catastrophe. Dans cet intervalle de temps, l'instabilité du terrain ou des constructions peut

provoquer des *accidents* : des incidents localisés (comme des effondrements) qui peuvent rendre un lieu inaccessible, ou une voie infranchissable.

Comportements Les personnes présentes sur la zone peuvent être *mobiles* (rescapés, blessés légers), ou *immobiles* (blessés, décédés ou entravés). Une personne peut aussi être inconsciente de la situation, jusqu'à ce qu'elle soit *alertée* d'une façon ou d'une autre.

Toute personne alertée tente de rejoindre au plus vite un des *points de convergence* (PC) de la zone. Ceci correspond à des comportements observés en situation de crise, où les gens se rendent à l'hôpital s'ils sont blessés, rejoignent les gares et aéroports pour quitter la zone, etc. Les points de convergence sont connus de tous ; les itinéraires qui y mènent peuvent toutefois être altérés par des accidents : si possible, les personnes concernées peuvent essayer de contourner les accidents, ou éventuellement de se diriger vers un autre point de convergence.

Dans certaines conditions, une personne alertée et en capacité de se déplacer peut aussi préférer rester immobile. C'est notamment le cas avec certains types de catastrophes pour lesquelles les autorités recommandent aux populations de rester à l'abris où elles se trouvent, par exemple dans le cadre de procédures de confinement. Une personne alertée peut aussi ignorer les consignes pour diverses raisons. Le nombre de personnes mobiles et immobiles peut donc fortement varier d'une situation à une autre, d'une population à une autre, et indépendamment de la gravité de la catastrophe et de leur capacité à se déplacer.

Matériel Les infrastructures de communication, partiellement détruites par la catastrophe et surchargées par les nombreuses tentatives de communication des personnes présentes et de leurs proches, sont supposées inopérantes. Le réseau électrique peut aussi être endommagé, ce qui aggrave encore l'état des communications et réduit significativement l'énergie disponible pour les transmissions.

Les équipements portatifs des personnes présentes restent toutefois utilisables, hors réseau mobile, dans la limite de l'autonomie de leurs batteries. On suppose qu'une partie au moins de la population présente dispose de tels terminaux (smartphones, tablettes ou autres) équipés d'interfaces sans-fil (Wi-Fi, Bluetooth) et capables de déterminer leur propre position, *via* le GPS ou toute autre solution exploitable. Ces terminaux disposent de ressources limitées en stockage, calcul et surtout énergie. Une application spécifique, dédiée à ces communications et à la transmission des données de géolocalisation, est installée sur une partie au moins de ces terminaux.

Malgré les dommages infligés aux infrastructures, on suppose possible l'installation préventive d'équipements dédiés dans certains des points de convergence. Ces points spécifiques peuvent notamment disposer d'une source d'énergie autonome (typiquement un groupe électrogène).

3.1.2 Objectifs

Notre étude a pour objectif de construire et d'évaluer un système de géolocalisation en situation de crise, répondant aux caractéristiques suivantes.

Usage immédiat – routage *ad hoc* Il doit être opérationnel dès les premiers instants, sans dépendre d'équipements additionnels (stations mobiles...) à l'exception des équipements déployés préventivement dans certains des points de convergence. Ceci implique aussi qu'aucun matériel spécifique ne peut être utilisé pour le routage, qui doit être géré par les terminaux.

Accessibilité Le système doit être accessible et utilisable par n'importe qui, sans nécessiter de compétences spécifiques ni de matériel dédié.

Collecte Les données sont centralisées vers des centres de collecte, choisis parmi les points de convergence, qui disposent de ressources en stockage, énergie et puissance de calcul suffisantes à leur exploitation.

Coordonnées récentes Les données collectées sont principalement les coordonnées des terminaux (donc de leurs porteurs) sur la zone, émises régulièrement. Notre priorité est de localiser le plus précisément possible les personnes, tout en minimisant les transmissions pour réduire la charge du réseau et surtout la consommation énergétique. Seules les coordonnées les plus récentes de chaque porteur doivent donc être transmises et conservées. À ces coordonnées peuvent être ajoutées des informations de statut permettant d'évaluer l'état du porteur (indemne, blessé, immobilisé...).

Cartographie des accidents La localisation des accidents est diffusée entre les terminaux pour permettre à leurs porteurs de les contourner en adaptant leur itinéraire. Ces informations sont aussi collectées par les centres, afin de cartographier les zones accidentées.

3.2 Architecture

3.2.1 Application

La défaillance des infrastructures de communication et la nécessité d'établir des communications immédiatement après la catastrophe pour collecter les données de géolocalisation dès les premiers instants excluent tout recours significatif aux infrastructures présentes, mais aussi aux équipements spécifiques déployés – tardivement – par les secouristes. L'utilisation de composants spécialisés, comme les terminaux TETRA ou P25 des secouristes, rendrait le système inaccessible au citoyen lambda ; cette solution n'a donc pas été retenue.

Notre architecture de collecte, dont le fonctionnement global est illustré par la figure 1.1, p. 3, présentée en introduction, repose donc principalement sur des communications point-à-point entre les terminaux mobiles « classiques » (smartphones, tablettes...), dont les personnes sont déjà équipées, et sur lesquels s'exécute une application spécifique dédiée, d'usage simple. Celle-ci sera idéalement installée de manière préventive dans les zones à risques, ou éventuellement diffusée entre les porteurs sur place [92], et activée par l'utilisateur en cas de crise. Elle reste inactive en temps normal, afin de préserver la vie privée de l'utilisateur, et la batterie de son terminal.

Cette application génère périodiquement un message contenant principalement les coordonnées courantes, mesurées par GPS ou autre. Elle peut aussi présenter à l'utilisateur une interface rappelant les consignes à suivre en fonction du type de catastrophe (comme le font déjà certaines applications [75]), la position et les itinéraires vers les points de convergence et autres informations utiles. L'utilisateur peut aussi y entrer des informations, comme son état, la position et l'état d'une autre personne (si son terminal est inactif, ou si elle n'en possède pas), ou encore des données de terrain : état des routes, accidents et autres effets de la catastrophe.

En arrière-plan, l'application exécute aussi un routeur DTN qui gère l'acheminement des messages vers leurs destinataires.

3.2.2 Collecte et exploitation

Les données doivent être mises à la disposition des secouristes lors de leur arrivée dans certains des points de convergence, qui prennent alors le rôle de centre de secours. Ceci peut alors s'envisager de différentes manières. En l'absence de matériel préalablement déployé, les données doivent rester stockées sur les terminaux mobiles après leur arrivée au point de convergence. Une fois les secouristes arrivés, les données peuvent être transférées vers leurs propres terminaux mobiles, et, plus tard, vers des équipements dédiés déployés sur le moment. L'autre possibilité consiste à déployer au préalable, dans chaque point de convergence, une installation spécifique dédiée qui collecte automatiquement les données dès leur réception au point de convergence – ainsi transformé en centre de collecte. De par la nature des points de convergence, ces solutions sont fonctionnellement équivalentes : dans les deux cas, les données sont géographiquement centralisées au niveau du point de convergence.

La première solution a l'avantage de ne reposer que sur les terminaux mobiles, sans aucune installation permanente supplémentaire. Elle est cependant sujette aux problèmes d'énergie, qu'elle accentue : l'application, toujours active sur les terminaux après leur arrivée, continue à consommer indéfiniment. La mise en place de communications internes au centre, nécessaires à la mise en commun des données, est aussi rendue difficile par les interférences, intensifiées par la concentration des terminaux.

Le déploiement préalable d'installations réseau – serveur et interfaces réseau sans-fil – résilientes dédiées aux opérations de recherche et secourisme, envisageable dans les points de convergence, permet au contraire de réduire la consommation énergétique globale et de la reporter sur la source d'énergie dédiée, tout en évitant les problèmes d'interférences. L'application et les interfaces sans-fil des terminaux peuvent être désactivées dès

les données transmises au système de collecte, à l'arrivée au centre. Cette installation disposerait en outre de ressources en calcul et stockage relativement conséquentes, permettant dès les premiers instants une exploitation plus poussée des données collectées et éventuellement une extension à d'autres usages.

Ces options ne sont pas mutuellement exclusives : le plus réaliste serait probablement d'envisager le déploiement de telles installations dans les points de convergence, mais en admettant que tous ne seront pas équipés et/ou que certains d'entre eux seront eux-mêmes défaillants. Le maintien des données sur les terminaux représenterait dans ce cas un fonctionnement en mode dégradé acceptable.

3.2.3 Interconnexion des centres de collecte

Cette solution rend aussi envisageable l'établissement de connexions directes entre les centres de collecte, *via* des liaisons sans fil résilientes à longue portée (laser, parabole, satellite [83]...). Les centres de collectes pourraient alors construire une vue globale et commune de la zone, et ainsi mieux coordonner les opérations de sauvetage, sans perdre de temps à chercher des personnes sur la base d'informations obsolètes – en particulier les personnes qui ont en réalité déjà rejoint un (autre) hotspot.

Aux points de convergence ne disposant pas de fonctions de collecte, ou défaillants, manquerait surtout cette fonctionnalité, que le *mode dégradé* reposant sur les terminaux ne permet pas de remplacer efficacement.

Nous supposons donc, pour la suite de notre étude, que certains points de convergence seulement sont équipés d'une installation spécifique, qui leur confère le statut de *centres de collecte*, ou « hotspots », interconnectés par des liaisons directes. Les autres points de convergence seront dit *inactifs*, *non communicants* ou *passifs*. Cette dernière hypothèse nous place dans la catégorie des scénarios 3-tiers selon la classification de [62] (terminaux mobiles, relais fixes et équipements de routage dédiés) qui apporte un gain significatif par rapport à une architecture 2-tiers, (sans équipements de routage dédiés).

Les données de géolocalisation sont émises par chaque terminal (et acheminées par l'ensemble des terminaux) à destination de ces centres de collecte. Les données qui parviennent aux points de convergence inactifs ne peuvent pas être collectées, et ne sont donc pas retransmises aux hotspots.

3.2.4 Obsolescence des données

Les terminaux mobiles en mouvement transmettent régulièrement leur localisation ; pour chaque porteur, un nombre important de coordonnées différentes le concernant peuvent donc être en circulation à un instant donné. L'analyse de l'ensemble des déplacements pourrait fournir des informations utiles, notamment pour l'évaluation de l'état du terrain, l'identification de lieux inexplorés et non couverts par le processus de collecte. Cependant la transmission de ces informations pourrait surcharger le réseau, déjà limité, et épuiser prématurément les batteries des terminaux mobiles, nuisant ainsi à la transmission de l'information prioritaire : la position la plus juste et la plus récente connue de chaque terminal.

Dans tous les cas, les informations doivent pouvoir être ordonnées ; éventuellement par un horodatage (en prenant en compte la dérive possible de chaque horloge), sinon au minimum par un numéro de version, qui permettra d'éliminer des transmissions, à la volée, les coordonnées obsolètes dès qu'une information plus récente est connue. C'est cette dernière solution que nous avons retenue pour notre implémentation, décrite en section 4.1 : chaque message de géolocalisation, est estampillé à partir d'un compteur incrémenté à chaque nouvel envoi par son émetteur.

3.2.5 Données de terrain

Contrairement aux données de géolocalisation et autres informations personnelles, les données de terrain (accidents, état des routes) sont utiles et doivent être diffusées à tous les nœuds. Les protocoles de routage DTN utilisés, quels qu'ils soient, devront donc être adaptés pour diffuser ces données plutôt que les délivrer de manière ciblée aux seuls hotspots. Dans notre implémentation, le protocole Epidemic est donc toujours utilisé pour les messages d'alerte et d'accident, indépendamment du protocole utilisé pour les informations de géolocalisation.

3.3 Mobilité

Les performances et l'efficacité d'une solution de communication point-à-point sur réseau mobile sont intimement liées à la mobilité des terminaux, donc de leurs porteurs. Or les modèles de mobilité habituellement utilisés, présentés en section 2.4.2, ne sont pas adaptés à notre scénario. C'est pourquoi *Danger Movement* a été conçu pour ce projet.

3.3.1 *Danger Movement*

Danger Movement simule le déplacement de (nombreuses) personnes conformément aux hypothèses présentées en section 3.1. *Danger Movement* modélise le comportement des personnes dans le cas d'une catastrophe non localisée : des *accidents* localisés peuvent survenir, mais il n'existe pas de point particulier représentant la catastrophe elle-même, comme on peut en trouver dans d'autres modèles.

Carte *Danger Movement* est un modèle de mobilité *contraint* : les déplacements des porteurs sont restreints aux chemins d'une carte fournie. À titre d'exemple, nous avons choisi d'exécuter nos simulations sur une carte de ville réelle : la figure 3.1 présente la carte originale, générée par OpenStreetMap (OSM) [94], et la carte produite pour ONE, avec les points de convergence, représentés par les points colorés sur la carte ONE (rouge pour les hotspots, bleu pour les PC inactifs). Ceux-ci sont placés aux emplacements d'hôpitaux existants, de gares, d'écoles, etc.

La carte peut être altérée au cours du scénario par les accidents, implémentés comme des événements qui condamnent définitivement une intersection. Les accidents sont déclenchés les uns après les autres selon une loi exponentielle de paramètre $\frac{1}{MTBA}$, où la



FIGURE 3.1 – Centre de Santiago : cartes OSM et ONE

variable *MTBA*, configurable, correspond alors au temps moyen entre deux accidents (*Mean Time Between Accidents*). Le nombre maximal d'accidents déclenchés est aussi configurable. Pour chaque accident, l'intersection touchée est choisie aléatoirement sur la carte.

Nœuds mobiles Les nœuds considérés dans le modèle sont principalement les terminaux des personnes présentes, qui peuvent être mobiles (portés par des rescapés), ou immobiles. Cette dernière catégorie représente aussi bien les terminaux des victimes de la catastrophe, blessées ou décédées, ou des personnes confinées, que des terminaux actifs abandonnés – voire des throwboxes.

Chaque nœud connaît la carte et est donc toujours capable de calculer un plus court chemin *hors sinistre* vers n'importe quel point. En revanche, un nœud n'a connaissance de la position d'un accident que s'il l'a vu (i.e. il est arrivé sur une intersection adjacente) ou si un autre nœud l'en a informé ; il peut donc être amené à recalculer un itinéraire en cours de déplacement pour éviter un accident qu'il vient de découvrir. Les nœuds mobiles, placés aléatoirement sur la carte en début de scénario, peuvent se déplacer sur la carte à des vitesses fixes ou aléatoires (bornées).

Points de convergence & hotspots Conformément à nos hypothèses, des hotspots sont placés sur la carte sous forme de nœuds immobiles de caractéristiques différentes. En revanche les points de convergence inactifs ne sont que des coordonnées connues de tous ; ne participant d'aucune manière aux communications, ce ne sont pas des nœuds de la simulation.

Les identifiants et positions des points de convergence sont connus de tous. Tout nœud peut donc identifier le plus proche, mais peut aussi choisir avec une certaine probabilité de se rendre vers un PC alternatif, aléatoire. Ceci permet de modéliser des comportements plus « humains », comme le réflexe des parents de récupérer leurs enfants à l'école (un point de convergence) au lieu de se rendre directement au centre de secours.

Une fois un point de convergence atteint, un nœud s'immobilise et, après avoir transmis ses données au serveur (s'il s'agit d'un hotspot), désactive son interface.

Conscience et états *Danger Movement* permet aussi qu'une partie des personnes présentes sur la zone, *a priori* mobiles, ne soient pas conscientes de la situation de crise. Un nœud peut être alerté dès le début de la simulation (selon une probabilité $P_{preWarned}$), le devenir spontanément en cours de simulation (probabilité $P_{selfWarn}$ à chaque pas de simulation – 0,1 s), être alerté par un autre nœud alerté (passant à portée de signal), ou ne jamais l'être. Une fois alerté, il cherche à rejoindre un point de convergence.

S'il n'est pas déjà alerté, un nœud peut se trouver, en début de simulation, soit dans la rue en déplacement aléatoire (probabilité P_{walk}), soit chez lui. À tout instant, un nœud se trouve donc dans l'un des états suivants :

Home Non alerté, le nœud reste chez lui.

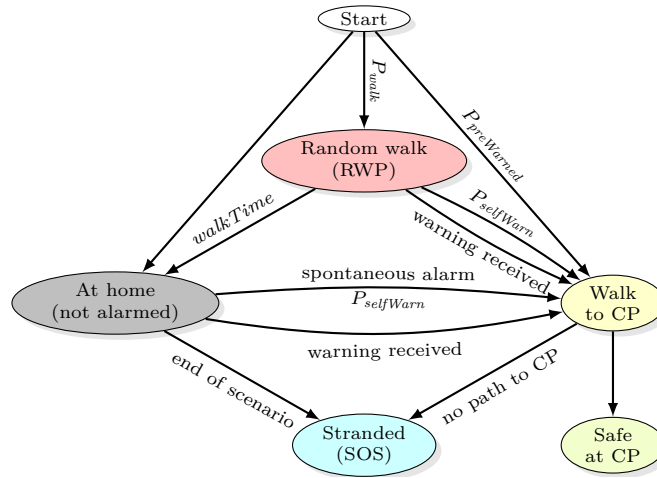


FIGURE 3.2 – Danger Movement : diagramme des états d'un nœud

Walk Non alerté, le nœud se déplace aléatoirement sur la carte (Map-Based Mobility). Après un temps maximal prédéfini *walkTime*, s'il n'est toujours pas alerté, le nœud passe à l'état Home.

Short Alerté, le nœud essaie de rejoindre un point de convergence, suivant le plus court chemin selon sa connaissance de la carte sinistrée.

Evac Le nœud a atteint un point de convergence ; il est alors immobile et inactif.

SOS Le nœud est immobilisé car « bloqué », c'est-à-dire qu'il se trouve dans l'une des situations suivantes :

- Alerté, il ne peut plus atteindre aucun des points de convergence ;
- Alerté, il avait choisi un point de convergence alternatif, qu'il ne peut plus atteindre ;
- La condition de *fin de scénario* a été atteinte alors que le nœud n'était toujours pas alerté ; il ne peut plus être alerté.

Chaque nœud mobile débute le scénario dans l'un des trois premiers états, selon des probabilités prédéfinies. Une fois alerté, il passe à l'état **Short**. La figure 3.2 résume les transitions entre sous-modèles.

En *fin de scénario*, i.e. lorsqu'une fraction prédéfinie `percentageToSave` de nœuds est « sauvée », le modèle de mobilité est légèrement modifié pour favoriser la stabilisation rapide de la situation : les nœuds non-alertés sont immobilisés (état SOS) et ne peuvent plus être alertés.

3.3.2 Graphes dynamiques

En situation réelle, la mobilité des personnes n'est pas prévisible – du moins pas complètement – et n'est connue que de manière locale. Un terminal mobile peut toutefois suivre les déplacements de son porteur, et surtout ses contacts avec les autres terminaux.

Si les terminaux s'échangent des informations de contact, il devient possible pour chacun de construire une vue partielle des contacts, dans son voisinage.

Nous avons voulu étudier ces suites de contacts, représentées sous forme de *graphes dynamiques*. L'objectif est de parvenir à en déduire suffisamment d'information pour caractériser la mobilité de chaque porteur, et surtout pour guider les décisions de routage, en favorisant les bons relais, pour maximiser les chances de transmission, ou les terminaux sous-exploités, pour équilibrer la charge, etc. La notion de centralité, et en particulier les mesures de betweenness centrality, présentées en section 2.5.3, semblent adaptées à ces besoins. Cependant, pour pouvoir passer à l'échelle en situation réelle, ces métriques doivent pouvoir être calculées de manière décentralisée, à partir d'échanges d'informations limités et donc, avec une vision locale, partielle, du graphe dynamique sur chaque terminal. Or, mis à part les solutions basées sur des instantanés agrégés, aucune des mesures de betweenness centrality existantes ne permet un calcul à la fois local et dynamique. De plus, la priorité dans notre architecture de collecte est la transmission des informations les plus récentes ; les mesures existantes ne sont pas optimisées en ce sens.

En collaboration avec l'équipe Complex Networks, nous avons contribué à la conception d'une nouvelle mesure de centralité pour les graphes dynamiques : l'ego-betweenness centrality sur flot de liens. La notion de *plus récents trajets* (most-recent paths) symétrique des trajets au plus tôt, a d'abord été définie : étant donnés deux sommets a et b et un temps d'arrivée t , les plus récents trajets de a à b à l'instant t sont les trajets de a à b , arrivant en b avant t , et partis de a le plus tard. Les informations en provenance de a acheminées *via* ces trajets sont donc les plus récentes dont peut disposer b à l'instant t .

Basée sur la betweenness centrality, l'ego-betweenness centrality sur flot de liens est calculée localement, à chaque instant, par chaque terminal e , à partir d'informations sur les contacts passés dans son voisinage (son ego-network) – son *ego-network* –. Elle mesure la somme, sur l'ensemble des couples (u, v) de nœuds de l'ego-network, des proportions de plus récents chemins de u vers v qui dépendent de e , ie. qui passent par e .

Comparée à deux autres métriques de centralité (coverage et snapshot-based) sur des jeux de données divers, l'ego-betweenness centrality s'est montrée dans presque tous les cas la plus adaptée pour caractériser la capacité des nœuds à relayer les informations dans le cadre d'une diffusion par inondation [79].

Ces premiers tests confirment qu'un calcul distribué, en temps réel et avec une connaissance limitée du réseau permet déjà d'évaluer, avec une faible erreur, les capacités relatives des nœuds à contribuer à la transmission d'informations. Des analyses complémentaires seraient maintenant nécessaires pour évaluer la pertinence de l'utilisation de l'ego-betweenness centrality sur flot de liens pour inférer des informations sur la mobilité des porteurs et optimiser le routage dans notre cadre de travail.

3.4 Communications et collecte

Le système développé sur ce scénario permet la transmission des données de géolocalisation vers les hotspots, et la diffusion des informations sur les accidents. Dans cette section sont décrits plus précisément ses fonctionnalités et nos choix de conception, puis les métriques proposées pour son évaluation.

3.4.1 Spécificités

L’acheminement des données de localisation ne présente pas les mêmes contraintes que des messages applicatifs classiques : comme énoncé en section 3.1.2, le système de localisation doit, au minimum, obtenir les coordonnées les plus récentes possibles du plus grand nombre possible de nœuds. Ainsi, sans besoin spécifique supplémentaire, toute information obsolète (ie. toute coordonnée d’un porteur pour lequel une information plus récente est connue) peut être supprimée, indépendamment de toute notion de délivrance. Les informations sur les accidents ne sont quant à elles pas versionnées : identifiées par les coordonnées de l’accident, chaque terminal doit simplement s’assurer de les déduplicer dès leur réception.

Cette particularité n’exempte cependant pas ces données des contraintes matérielles. La capacité de stockage limitée des terminaux peut ainsi être limitante : si la mémoire ne suffit pas à stocker toutes les données reçues, le nœud devra choisir les données à conserver. De même, les limitations en débit (partagé avec la transmission des paquets applicatifs et de routage), temps de contact et consommation énergétique obligent à réduire la quantité de données transmises. Bien que les coordonnées elles-mêmes représentent un volume de données relativement faible – en particulier si l’on ne conserve que les plus récentes –, un système plus complexe pourrait nécessiter la transmission d’informations complémentaires, éventuellement ciblées. Dans notre cas, les hotspots – serveurs dédiés au traitement des données de localisation – sont des destinations prioritaires, qui pourraient aussi exploiter des informations plus anciennes pour reconstituer les trajectoires des nœuds, localiser des zones particulières (congestionnées, ou au contraire désertes), ou des routes inaccessibles, essayer de prévoir les déplacements des nœuds, etc.

Par ailleurs, les données de géolocalisation doivent être acheminées vers les hotspots ; – c’est-à-dire vers l’un au moins des hotspots –, lesquels se synchronisent entre eux en ne conservant eux aussi que les informations les plus récentes. Du point de vue des terminaux, il s’agit donc d’assurer un routage *anycast* de données versionnées, avec suppression des versions obsolètes. La localisation des accidents, par contre, doit être transmise autant que possible à tous les nœuds : c’est une diffusion en *broadcast*. Les accidents étant peu nombreux (10 dans nos simulations), nous n’avons pas jugé nécessaire de mesurer l’efficacité de la transmission de ces données ni leur impact direct sur la charge du réseau. Ils ont toutefois un impact indirect sur les performances, en modifiant la mobilité des porteurs.

3.4.2 Messages

Trois types de messages sont utilisés :

géolocalisation : les coordonnées d'un nœud, destinées aux hotspots ;

accident : les coordonnées d'un accident (tel que défini en section 3.1), à diffuser ;

alerte : un paquet spécial qui rend tout récepteur *alerté*, sans porter aucune autre information.

Les paquets d'alerte représentent la transmission de l'alerte, qui peut se faire de manière automatique (si l'application est au moins partiellement active sur le terminal récepteur) ou simplement de visu (un porteur qui « rencontre » des personnes alertées est alerté). Ils sont créés automatiquement par les nœuds alertés. Les messages d'accident sont eux générés par tout nœud qui découvre un accident. Chaque nœud est équipé d'un GPS, ce qui lui permet à tout moment de générer un message de géolocalisation.

Pour optimiser les transmissions, les messages, de très petite taille, sont agrégés en trames de taille maximale fixe (MTU) au moment de leur envoi.

3.4.3 Interfaces et protocoles

Dans un contexte de crise, le réseau électrique peut être défaillant, laissant pour seules sources d'énergie les batteries des terminaux mobiles. Une attention particulière doit donc être portée lors de la conception des communications à la consommation énergétique de chacun des porteurs qui coopèrent à la cartographie de la zone.

Interface Chaque nœud et chaque hotspot est équipé d'une interface de communication sans-fil. Nous avons retenu pour nos tests les interfaces Wi-Fi ou Bluetooth, toutes deux disponibles sur la grande majorité des terminaux grand-public. Les interfaces Wi-Fi disposent d'une plus grande portée, ce qui est *a priori* un avantage, mais Bluetooth présente une consommation énergétique plus faible [55]. Utiliser simultanément les deux interfaces pour les transmissions serait envisageable, et pourrait notamment permettre d'intégrer au réseau les terminaux ne disposant pas de la « bonne » interface, ou sur lesquels celle-ci serait désactivée, ou encore de jouer sur les puissances d'émission pour réduire la consommation, comme le proposent les auteurs de COPE [84]. Nous avons préféré évaluer séparément les performances d'interfaces de portées différentes pour la collecte des données.

On notera que chacune de ces deux interfaces propose des modes ou protocoles spécifiques permettant des communications *ad hoc* : Wi-Fi *ad hoc*, Wi-Fi Direct, Wi-Fi Mesh, Mumble [68], ou piconet/scatternet Bluetooth, Bluetooth Mesh, Broadcast mode, Connectionless Broadcast.

Intermittence Afin de réduire la consommation énergétique de chaque terminal, la mise en place d'un mécanisme de transmission économe reposant sur une désactivation cyclique de l'interface radio semblerait approprié. Nous avons donc envisagé l'utilisation d'*interfaces intermittentes*, dont l'interface radio est régulièrement activée et désactivée.

Les hotspots, supposés alimentés par le secteur ou, si nécessaire, par un générateur de secours, ne sont pas soumis à cette limitation d'énergie. Leurs interfaces resteront donc actives en permanence.

Une synchronisation parfaite des périodes d'activité et d'inactivité entre tous les terminaux est difficilement réalisable dans le cas général. Au contraire, la situation inverse doit absolument être évitée : deux terminaux, à portée l'un de l'autre, suivant un cycle d'activation périodique et synchronisés sur la même période mais déphasés, de sorte que leurs périodes d'activité sont disjointes sur toute la durée de leur contact, ne pourront jamais communiquer.

Nous avons donc choisi un fonctionnement pseudo-périodique, comparables au protocole de découverte de voisinage de Wi-Fi Direct ¹ : chaque interface est active pendant un temps *active*, puis désactivée pour un temps aléatoire compris entre *minInactive* et *maxInactive*. Par exemple, pour nos tests sur interfaces intermittentes nous avons fixé ces valeurs à *active* = 30 s, *minInactive* = 30 s et *maxInactive* = 90 s – soit un rapport cyclique moyen de $\frac{1}{3}$. Ainsi, deux terminaux dont les périodes d'activité sont disjointes à un instant donné finiront avec une forte probabilité, après quelques cycles, par se désynchroniser et pourront ainsi communiquer.

Routeur Sur cette interface s'exécute un routeur DTN. Les protocoles « complexes » ne sont pas viables dans ce contexte (voir section 2.3.3) : dans notre scénario, les informations de géolocalisation sont toutes destinées aux hotspots. Or dans la quasi-totalité des cas, un paquet envoyé par un hotspot serait reçu par un nœud qui converge vers ce hotspot, donc qui s'apprête à désactiver son interface. Impossible donc de profiter des optimisations d'un protocole qui tenterait d'établir des règles de routage basées sur la transmission de messages en provenance des hotspots. Nous avons donc choisi de tester sur notre scénario avec les deux protocoles simples Epidemic et Spray and Wait.

Epidemic est l'un des plus simples protocoles de routage sur DTN : chaque fois que deux nœuds se rencontrent, ils comparent leurs listes respectives des messages qu'ils portent, et échangent leurs « nouveaux » messages. Une politique FIFO est utilisée pour la gestion des messages lorsque le buffer est plein. La diffusion n'est limitée que par le débit des communications, les temps de contact, la capacité de stockage des terminaux et, sur plus long terme, l'énergie disponible. En l'absence de ces limites, c'est-à-dire si on suppose que les données sont suffisamment petites et les temps de contact suffisamment longs, Epidemic fournit les meilleures performances de transmission possibles, puisque chaque message suit tous les chemins possibles.

Spray and Wait [24] (SnW) est un compromis simple entre le routage basé sur la réplique – comme Epidemic – et le routage par transmission. À sa création, un message est répliqué n fois. Ces copies sont d'abord diffusées (spray), puis chaque copie reste en attente (wait) que son hôte rencontre son destinataire. Si le buffer vient à être plein,

1. Un standard permettant des communications Wi-Fi sans point d'accès intermédiaire.

une politique de gestion (FIFO par exemple) doit être appliquée ; les auteurs de Spray and Wait n'en proposent cependant aucune. Plusieurs variantes sont possibles pour la première phase, comme Source Spray and Wait, où le nœud émetteur du message transmet ses copies une par une, à chaque contact avec un voisin qui n'en a pas encore reçu. Nous avons choisi d'utiliser Binary Spray and Wait, qui présente les meilleures performances dans le cas général [38] : chaque nœud disposant de plus d'une copie, y compris l'émetteur après la création du message, en transmet la moitié ($\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$) à chaque contact.

Spray and Wait a ainsi l'avantage de limiter, et même de borner de manière prédictible, le nombre de messages qui circulent sur le réseau, ce qui garantit aussi une certaine équité entre les messages. Avec Epidemic, le nombre de copies en circulation d'un message dépend de nombreux paramètres, comme les temps de contact et l'ordre d'envoi, qui déterminent l'ensemble des messages transmis avec succès. Avec Spray and Wait, le même nombre de « chances » est donné à chaque message. Mais cette limite peut aussi nuire aux performances globales de transmission : une fois l'ensemble des copies disséminées, celles-ci ne peuvent plus être transmises à de meilleurs relais rencontrés, même si les temps de contact le permettraient alors. Si aucun des nœuds portant les copies du message n'arrive jusqu'au destinataire, le message n'y parviendra pas non plus.

Il convient de noter que seules les informations de géolocalisation sont concernées par le choix de protocole. Les messages d'accidents et d'alerte doivent être diffusés à tous les nœuds, et suivent donc toujours le protocole Epidemic.

Versions Par ailleurs, ces protocoles ont été adaptés pour prendre en compte la version des messages : un message est automatiquement supprimé dès qu'une version plus récente est reçue. Pour Spray and Wait, cette suppression peut concerner plusieurs copies, indépendamment du nombre de copies reçues pour le message plus récent : une copie d'un message peut remplacer (et évincer) plusieurs copies d'un message plus ancien.

Acquisition & limites On suppose que la position renvoyée par le système de positionnement est toujours exacte : pas d'erreur, d'interpolation ni d'échantillonnage. Dans ces conditions, deux nœuds de déplaçant ensemble pourraient échanger en permanence leurs positions, générant chacun plusieurs fois par seconde un nouveau message. Il en résulterait une inondation incontrôlable de tout le réseau et une consommation d'énergie largement excessive et inutile.

Nous avons donc défini un délai de ré-émission, pendant lequel un nœud a ne peut pas ré-émettre un message déjà transmis à un nœud b , même s'il dispose d'une version plus récente. Cette limite concerne les messages créés par a (sa propre localisation), mais aussi tout message de géolocalisation dont il a échangé récemment une version avec b . On évite ainsi la création de petites trames en continu.

3.4.4 Métriques d'évaluation

Les métriques couramment employées pour l'évaluation de protocoles de routage mesurent principalement leur capacité à délivrer les messages, la surcharge (overhead) de routage, la consommation énergétique et le temps de transmission. Dans notre scénario, une grande partie des messages est rendue obsolète et (volontairement) supprimée automatiquement. Ceci rend la mesure d'un taux de délivrance (p.ex. throughput, PDF, NRL...) peu pertinente, et la surcharge difficile à mesurer : une information qui arrive au hotspot, mais est ensuite rendue obsolète par une mise à jour, est-elle une surcharge ?

Plus généralement, notre étude porte surtout sur les performances en terme de collecte d'information. Les propriétés du système qui nous intéressent sont sa capacité à recueillir la géolocalisation du plus grand nombre de personnes, avec la meilleure précision et la plus faible consommation possible.

Nous avons donc défini des métriques spécifiques.

Fraction de nœuds connus (%) la fraction des nœuds, à chaque instant, connus des hotspots (c.-à-d. de l'un au moins des hotspots). Dans l'hypothèse où les liaisons inter-hotspots fonctionnent, maximiser cette métrique est l'objectif principal du système.

Fraction des liens de connaissance (%) la fraction des liens « le hotspot x connaît y » par rapport à l'ensemble de liens de connaissance possible ; autrement dit la somme des nombres de porteurs connus par chaque hotspot, normalisée pour obtenir une valeur entre 0 et 100. Cette métrique pourrait permettre de mesurer la redondance de la collecte parmi les hotspots, afin d'évaluer l'impact qu'aurait sur le système la défaillance d'un ou plusieurs hotspots, ou de l'interconnexion des hotspots.

Erreur moyenne de localisation (m) l'erreur moyenne en distance euclidienne, sur l'ensemble des porteurs connus, entre position connue et position réelle. Plus parlante que l'âge ou l'estampille d'un message de localisation, elle dépend de la distance parcourue par chaque porteur depuis l'émission du dernier message reçu par les hotspots.

Nombre moyen de messages envoyés le nombre moyen, à chaque instant, de trames transmises par un nœud. Avec le volume de données envoyées ci-dessous, cette métrique fournit une première approximation de la consommation énergétique globale du système. On peut en effet raisonnablement supposer que la consommation des autres opérations spécifiques au routage (calculs et de stockage), est faible devant les transmissions (émission et réception) de messages.

Volume moyen de données envoyées le volume moyen, à chaque instant, des données transmises par un nœud. Lié au nombre de trames transmises, le volume de données dépend directement de leur « remplissage », qui peut être réduit si l'émetteur n'a plus assez de message à transmettre pour former un trame pleine ; en particulier si, avec Spray and Wait, il ne dispose plus que d'une copie des autres messages.

Les porteurs immobiles ou *victimes* étant notre cible prioritaire, nous avons spécialisé ces métriques pour évaluer plus spécifiquement la capacité du système à les localiser :

Fraction de nœuds *mobiles* / *statiques* connus (%) la fraction des nœuds localisés, mesurée spécifiquement sur l'ensemble des porteurs mobiles (resp. immobiles).

Fraction des liens de connaissance (%) la fraction des liens de connaissance hots-pot/porteur, mesurée spécifiquement sur l'ensemble des porteurs mobiles (resp. immobiles).

Nombre moyen de messages envoyés par nœud *connu* le nombre moyen de messages envoyés, normalisé par la fraction de porteurs localisés.

3.4.5 Plateforme de test matérielle

Afin de valider la faisabilité de notre solution, nous avons commencé la construction d'une plateforme de test matérielle. Dans notre scénario, les terminaux mobiles utilisés sont des terminaux grand-public (type smartphone). Or, si les interfaces sans-fil sont couramment simulées lors de la mise au point de protocoles ou d'algorithmes répartis, avec une émulation plus ou moins précise des protocoles réseau utilisés, il reste pourtant difficile dans la réalité d'exploiter les interfaces de terminaux mobiles, Wi-Fi ou Bluetooth, pour échanger des données en pair-à-pair, avec des nœuds inconnus, sans interventions récurrentes de l'utilisateur. Les terminaux commercialisés sont, pour des raisons avancées de sécurité, bridés dans leurs opérations de communication. Sans des modifications relativement complexes du système d'exploitation pour obtenir les privilèges d'administrateur, il est ainsi impossible d'utiliser des protocoles de communication hors infrastructure comme Wi-Fi Mesh, et d'autres comme Wi-Fi Direct nécessitent une action de l'utilisateur à chaque nouvelle connexion avec un terminal voisin.

Pour contourner ces limitations, nous avons utilisé pour notre plateforme des pico-ordinateurs Raspberry Pi. Ces ordinateurs à peine plus gros qu'un smartphone exécutent Raspbian, un portage de la distribution GNU/Linux Debian. Équipés d'une interface Wi-Fi, optionnellement d'un petit écran tactile, et alimentés par une batterie externe portable, ils fournissent un environnement de test complet, comparable aux terminaux mobiles et sans aucune limitation logicielle.

Pour nos premiers tests, nous avons implémenté sur cette plateforme les protocoles Epidemic et Spray and Wait originaux, sans les modifications spécifiques à notre système de géolocalisation. La découverte du voisinage est gérée par le protocole Wi-Fi utilisé – Wi-Fi Ad-hoc ou Wi-Fi Mesh –, et les échanges de messages se font par broadcast.

De taille trop modeste pour pouvoir tester un protocole à une échelle réaliste, cette plateforme-prototype nous a déjà permis de valider la faisabilité de notre système, et pourrait être agrandie. Elle permettrait alors aussi de réaliser des évaluations grandeur nature, avec une mobilité naturelle – au moins pour des situations non catastrophiques et tous les aléas du monde réel, difficiles à simuler : disparités de puissance des interfaces, obstacles aléatoires, interférences de l'environnement, etc.

Le chapitre suivant présente l'implémentation de notre système sur simulateur, ainsi qu'une analyse des métriques d'évaluation proposées en section 3.4.4 à partir des valeurs obtenues sur de premiers tests. À l'issue de cette analyse préliminaire, nous sélectionnons les métriques les plus pertinentes pour les évaluations suivantes du système de géolocalisation.

Chapitre 4

Plateforme de simulation

Ce chapitre est consacré à notre plateforme de test par simulation. Nous présentons d’abord le simulateur, et notre implémentation du système, du modèle de mobilité aux protocoles de routage. Nous définissons ensuite un scénario de référence, et discutons les premiers résultats de simulation. À partir de ces résultats, nous évaluons et comparons les métriques proposées en section 3.4.4 afin de sélectionner les plus pertinentes.

4.1 Implémentation

Danger Movement et les solutions proposées ont été implémentés sur le simulateur The ONE [39], développé en Java et capable de simuler les déplacements de la population en milieu urbain et les contacts résultants, ainsi que des protocoles de routage et applications s’exécutant sur le réseau ainsi formé. Après une rapide présentation de The ONE, nous décrivons ici les principales fonctionnalités ajoutées spécifiquement pour ce projet.

4.1.1 The ONE

The ONE est un simulateur de réseaux opportunistes, capable de simuler les mouvements d’un ensemble de nœuds, les liens résultants, les transferts de données et les files d’attente d’émission, en prenant en compte les limitations matérielles (en bande passante, taille de buffer, etc.). The ONE est un simulateur à événements discrets : le temps est discrétisé en *pas* de durée prédéfinie (fixé à 0,1 s pour toutes nos simulations).

La configuration permet de répartir les nœuds en un nombre quelconque de groupes, représentant les « types » de nœuds : les nœuds d’un même groupe partagent les mêmes caractéristiques, comme le modèle de mobilité, le nombre et le type des interfaces dont ils disposent, le protocole de routage (et les paramètres spécifiques correspondants), la taille de leur buffer, etc. Dans notre cas, les différents types sont les porteurs mobiles, les porteurs immobiles (victimes), les hotspots et, dans les derniers tests, les véhicules. Notons qu’un nœud ne peut pas changer de groupe en cours de simulation.

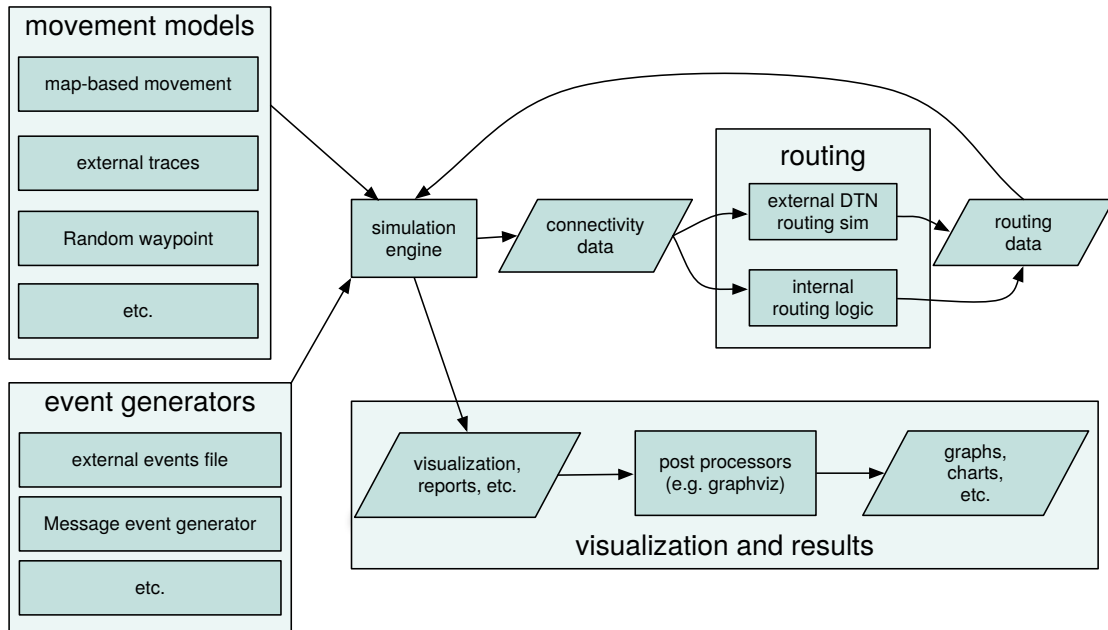


FIGURE 4.1 – The ONE : diagramme de structure

Il est aussi possible de choisir et paramétrer des modules de sortie, permettant la génération de rapports, ainsi que des générateurs d'événements, qui déclenchent des événements indépendamment du comportement des nœuds. Un certain nombre de ces modules sont fournis avec The ONE.

La figure 4.1 présente la structure de The ONE. Le moteur de simulation dirige l'exécution des modules, répartis en quatre catégories, décrites ci-dessous avec pour chacune la liste des modules fournis par The ONE :

Movement model Le modèle de mouvement des nœuds : une méthode de ce module, appelée régulièrement pour chaque nœud, renvoie une liste de déplacements à effectuer.

Random waypoint, map based movement, shortest path map based movement, map route movement, external movement (mouvement dirigé par des traces pré-enregistrées).

Routing Le protocole de routage : gère le traitement et la retransmission des paquets sur chaque nœud.

First Contact, Epidemic, Spray and Wait, Direct delivery, ProPHET, MaxProp, Passive router (routage par une application de simulation de DTN externe).

Event generators Les générateurs d'événements peuvent générer des messages, routés par les nœuds.

MessageEventGenerator (générateur aléatoire),
ExternalEventsQueue (événements pré-enregistrés).

Vizualisation and results La sortie du programme : une interface graphique interactive, des rapports, etc.

Sur chaque nœud, les différents modules actifs (routeur, applications et modèle de mobilité) peuvent communiquer par appel de méthode, ou *via* un bus logiciel simulé (`ModuleCommunicationBus`), utile pour des besoins plus spécifiques, notamment entre modèle de mobilité et routeur ou application (accidents, état *Danger Movement*, désactivation à l'arrivée au hotspot, etc.)

4.1.2 Danger Movement

Danger Movement a été implémenté comme un module *Movement model* dérivé de `ExtendedMovementModel`, qui implémente un mécanisme de commutation de sous-modèles. Ceci permet de modifier le comportement de chaque nœud au gré de ses changements d'états, eux-mêmes implémentés comme sous-modèles de mobilité.

Accidents Les accidents sont implémentés par des *événements* aléatoires qui bloquent une intersection. Chaque nœud peut alors prendre connaissance de l'accident lorsqu'il passe à proximité ou par le biais d'un message *accident*. *Danger Movement* peut alors adapter l'itinéraire ou, s'il est cerné par les accidents, passer à l'état SOS.

Arrivée au centre de collecte À l'arrivée d'un nœud à un centre de collecte, *Danger Movement* déclenche la désactivation du terminal : le routeur refuse les connexions autres qu'avec le hotspot, termine ses transmissions puis désactive l'interface.

4.1.3 Application

L'application mobile et l'application de collecte exécutée par les hotspots sont implémentées par des modules ONE de type *application*. L'application des porteurs mobiles gère la génération des messages et la diffusion sur le bus des accidents découverts. Sur les hotspots, l'application gère la réception et le stockage des informations de géolocalisation des porteurs et des accidents.

Format des messages Trois types de messages sont utilisés, identifiés par leur champ *type*. Leurs formats respectifs sont les suivants :

Message de géolocalisation

- le type (géolocalisation) : 2 octets ;
- l'identifiant unique du terminal : 6 octets ;
- une estampille / version : 4 octets ;
- ses coordonnées géographiques : 8 octets.

Message d'accident

- le type (accident) : 2 octets ;
- ses coordonnées géographiques : 8 octets.

Message d'alerte

— le type (alerte) : 2 octets ;

Le type est un entier attribué de manière globale (le protocole peut ainsi être utilisé par d'autres applications, en définissant des types autres que les trois utilisés ici). Les messages de géolocalisation, les seuls versionnés, sont identifiés par leur type et l'identifiant de l'émetteur, qui en forment ainsi la clé : l'estampille est un numéro de version propre à cette clé. À chaque génération d'un message par un nœud, l'estampille est incrémentée. La taille totale d'un message ainsi formé est donc de 20 octets. Un message d'accident est identifié par ses coordonnées et ne porte pas d'estampille, soit une taille de 10 octets. Un message d'alerte ne porte aucune donnée ; seulement les 2 octets de type.

4.1.4 Simulation des interfaces

Contrairement à des simulateurs plus traditionnels comme NS2/NS3 [34] ou encore OMNeT++ [13] par exemple, initialement développés pour simuler précisément des réseaux fixes, l'objectif de The ONE n'est pas de reproduire précisément les protocoles de couches basses. La couche physique, implémentée par des modules *interfaces*, gèrent les connexions et déconnexions dues à la mobilité et les transferts de messages selon la portée de transmission et le débit configurés. Les collisions en revanche ne sont pas simulées : chaque connexion est indépendante. La classe `InterferenceLimitedInterface` permet cependant de rendre les échanges plus réalistes en adaptant dynamiquement le débit de chaque connexion selon le nombre de connexions actives à portée de signal [8]. Nous en avons dérivé une classe `IntermittentInterferenceLimitedInterface`, qui implémente une interface intermittente.

Les détails des protocoles Wi-Fi et Bluetooth n'étant pas implémentés dans The ONE, la seule différence prise en compte est la portée : 100 m pour Wi-Fi, 10 m pour Bluetooth.

4.1.5 Routeur

Plusieurs protocoles sont déjà implémentés dans The ONE – dont Epidemic et Spray and Wait –. Cependant les protocoles de routage sur MANET/DTN sont généralement testés avec des messages de plus grande taille : de 64 octets pour des MANET à 100 Kio sur DTN. The ONE a donc été conçu pour manipuler des gros paquets, dont la transmission s'étend sur plusieurs pas de simulation : il n'était capable dans son implémentation initiale que de transférer, sur chaque connexion, au maximum un message par pas de simulation.

Or la taille de nos messages n'excède pas 20 octets. Avec un pas de 0,1 s, cela représente un débit de seulement 200 os^{-1} . Réduire le pas de simulation serait bien sûr possible mais alourdirait considérablement la simulation. Pour plus de réalisme (et pour éviter l'envoi de nombreux messages peu chargés, donc un overhead excessif induit par les couches réseau inférieures), nous avons donc implémenté une couche intermédiaire – équivalent de la couche liaison, inexistante dans ONE – qui gère l'agrégation des messages en trames de taille maximale prédéfinie (MTU) et permet la transmission de plusieurs trames dans un même pas de simulation.

Les protocoles Epidemic et Spray and Wait, adaptés pour gérer des messages versionnés, et les délais de ré-émission, présentés en section 3.4.3, ont été réimplémentés sur cette nouvelle couche.

4.1.6 Export des résultats

The ONE fournit des modules de génération de rapports au format texte. Étant données la taille des informations générées et leur caractère purement numérique, nous avons choisi d'implémenter un nouveau module de sortie vers une base de données SQLite. Les données ainsi obtenues peuvent ainsi être manipulées par des requêtes SQL et bénéficier du traitement optimisé propre aux bases de données relationnelles, tout en restant contenues dans un unique fichier.

Ce module de rapport enregistre, à intervalle régulier, la dernière position émise, la position actuelle et les statistiques de routage (nombre et taille totale des trames envoyées) de chaque nœud, et l'ensemble des données de localisation reçues par chaque centre de collecte.

4.1.7 Paramètres et exécutions

Tous les paramètres (nombre et rôles des nœuds, interfaces, protocoles, probabilités, etc.) utilisés sont configurables. Le tableau 4.1 résume les paramètres communs à toutes les simulations. On notera que le nombre total de nœuds considérés (2000) est cohérent avec la taille de la zone [66]. Par ailleurs, le nombre de points de convergence peut varier d'un scénario à l'autre (3, 5, or 20), mais le nombre de hotspots est toujours de 3.

Pour chaque ensemble de paramètres, plusieurs simulations sont exécutées. Les résultats obtenus sont ensuite fusionnés en calculant, pour chaque jeu de simulations, pour chacune des métriques et à chaque instant, les valeurs minimale, moyenne et maximale, et l'écart type.

4.2 Scénario de référence et analyse préliminaire

Dans cette section sont présentés les résultats des premières évaluations. Nous définissons d'abord un scénario de référence, dont les performances sont mesurées suivant les différentes métriques définies en section 3.4.4. Ces résultats permettent dans un premier temps de tester ces métriques afin d'en sélectionner les plus pertinentes pour l'évaluation des performances de collecte et de l'efficacité énergétique de notre architecture.

Pour chaque ensemble de paramètres, au moins 10 simulations ont été exécutées. Chaque courbe représente les valeurs moyennes pour ces simulations.

Le tableau 4.2 résume les paramètres spécifiques du scénario de référence. Sur les 2000 personnes présentes, 200 (soit 10 %) sont immobiles.

Les 1800 personnes *a priori* mobiles se déplacent à une vitesse constante commune proche de la marche et tentent, dès qu'elles sont conscientes de la situation de crise de rejoindre le point de convergence le plus proche.

TABLEAU 4.1 – Paramètres de simulation communs

Carte	Santiago Center, 29 km ²
Temps simulé	10 000 s ($\sim$ 2 h45 min)
Pas de simulation	0,1 s
Accidents	10, MTBA : 500 s
Points de convergence	3 5 20
dont hotspots	3
Nœuds	2000
P_{walk}	.14
$P_{preWarned}$	.8
$P_{selfWarn}$	10^{-6}
Interface (portée)	Wi-Fi (100 m) Bluetooth (10 m)
Débit	250 ko s ⁻¹
MTU	1500 o
Délai ré-émission	300 s
Param. Spray and Wait	binaire, 8 copies

TABLEAU 4.2 – Paramètres de simulation – scénario de référence

Nœuds mobiles/victimes	1800/200
Vitesse	constante, 1,3 m s ⁻¹ ($\sim$ 4,7 km/h)
Choix PC	Plus proche
Interface	Wi-Fi (100 m) Bluetooth (10 m), continue
Protocole	Epidemic Spray and Wait

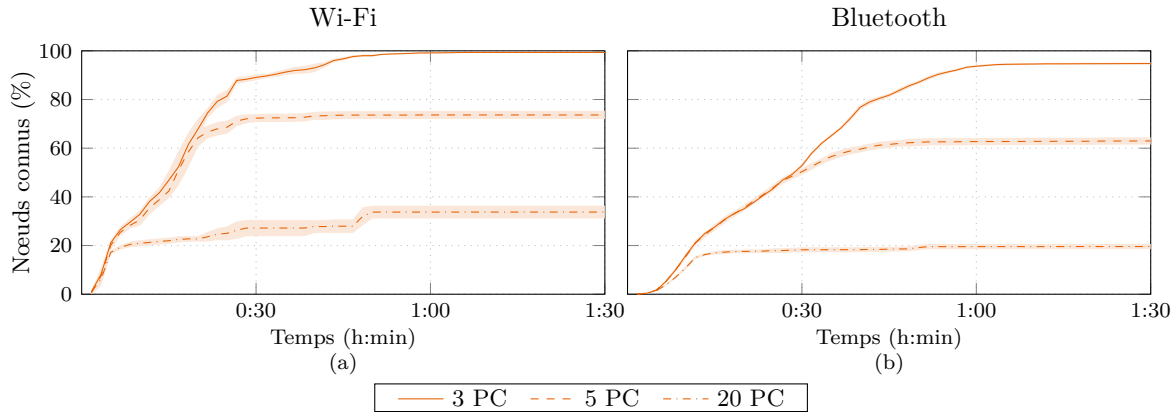


FIGURE 4.2 – Scénario de référence : Wi-Fi vs. Bluetooth, routage Epidemic
– proportion de porteurs connus

Pour ce premier test, nous comparons l'utilisation sur ce scénario d'interfaces Wi-Fi et Bluetooth, avec un routage Epidemic.

4.2.1 Généralités

La figure 4.2 présente les premiers résultats de mesure de la proportion des porteurs connus. Pour chaque jeu de paramètres, la mesure moyenne sur l'ensemble des simulations effectuées est tracée, l'aire teintée représente l'écart-type.

On peut tout d'abord observer que toutes les simulations se stabilisent avant 1 h 30 min. À ce moment, la plupart des porteurs mobiles ont atteint un point de convergence, la collecte n'évolue plus et les échanges de messages se font rares. Dans aucune des simulations le système n'atteint une connaissance complète de la position de tous les porteurs. On obtient tout de même dans le meilleur cas $\sim 99,5\%$ de nœuds connus, soit seulement une douzaine de porteurs non localisés.

En Wi-Fi comme en Bluetooth, le nombre de porteurs localisés dépend principalement du nombre de points de convergence : seuls 3 points de convergence étant des hotspots, l'ajout de points de convergence (passifs) supplémentaires provoque une dispersion des porteurs à l'écart des hotspots, réduisant de ce fait leurs chances d'atteindre ou de transmettre leur position à un hotspot. En conséquence, les performances en terme de nœuds connus baissent de manière significative avec le nombre de points de convergence. La section suivante propose une quantification approximative de cet effet.

Les interfaces Wi-Fi (fig. 4.2a), avec leur plus grande portée, donnent de meilleurs résultats que Bluetooth. Le temps de stabilisation du système est plus long de 12 $\sim$ 15 minutes environ en Bluetooth, et le nombre de porteurs découverts est plus faible d'environ 5 à 14 % des porteurs selon le nombre de points de convergence, en particulier avec 5 et 20 PC.

On remarquera enfin que l'écart-type est très faible sur tous les jeux de paramètres, ce que nous avons aussi pu observer sur toutes les autres simulations. Afin d'alléger les

graphiques, il ne sera plus représenté sur les résultats suivants.

4.2.2 Points de convergence et dispersion

Dans notre modèle de mobilité *Danger Movement*, chaque porteur mobile alerté se dirige vers le point de convergence *le plus proche*. On pourrait donc segmenter la zone selon le diagramme de Voronoï associé à l'ensemble des points de convergence (fig. 4.3), chaque cellule du diagramme délimitant l'ensemble des porteurs susceptibles de se rendre au point de convergence correspondant. Au sein d'une cellule, les porteurs ont globalement une mobilité convergente, qui tend à les isoler des autres cellules tout en favorisant l'acheminement des données vers le point de convergence. S'il s'agit d'un hotspot, les informations de géolocalisation concernant les personnes se trouvant dans la cellule – qu'elles soient mobiles ou immobiles, alertées ou non –, pourront avec une forte probabilité être collectées par ce hotspot « local ». Elles pourront aussi éventuellement atteindre un autre hotspot, en profitant de contacts inter-cellules, avec une probabilité vraisemblablement faible par rapport à l'acheminement vers le hotspot local, fortement dépendante des paramètres de communication et difficile à prédire. Dans la cellule d'un point de convergence non communicant au contraire, les porteurs dépendent entièrement de ces contacts inter-cellules pour atteindre un hotspot.

Sous ces hypothèses simplificatrices, la situation optimale où tous les points de convergence sont des hotspots fournit une approximation de la proportion K des nœuds localisés *via* le hotspot de leur propre cellule – pour ce premier jeu de paramètre, environ 100 % avec des interfaces Wi-Fi, 95 % en Bluetooth. Dans les autres cas, lorsque l'on introduit des points de convergence non communicants, cette valeur permet d'estimer *a priori* les performances des cellules des hotspots : si les porteurs sont uniformément répartis entre les cellules, la proportion de porteurs localisés devrait donc être, en première approximation, au moins égale à $\frac{n_{hotspots}}{n_{PC}} \cdot K$ (où $n_{hotspots}$ et n_{PC} représentent respectivement le nombre de hotspots et le nombre total de PC). Sur nos scénarios à 5 et 20 points de convergence dont 3 hotspots, avec des interfaces Wi-Fi, on peut donc s'attendre respectivement à au moins $3/5 = 60\%$ et $3/20 = 15\%$ de porteurs localisés par leurs hotspots de cellule respectifs. Avec des interfaces Bluetooth, qui permettent de localiser $\sim 95\%$ des porteurs avec les 3 hotspots seulement, ces valeurs sont légèrement abaissées à $\sim 57\%$ et $\sim 14\%$.

Cette estimation est évidemment très approximative, la réalité dépendant de nombreux paramètres, comme l'uniformité de la répartition géographique des points de convergence, mais permet tout de même de poser des ordres de grandeurs pour évaluer et comparer les résultats. En l'occurrence, sur ce premier jeu de paramètres, le système localise respectivement, avec 5 et 20 points de convergence, 74 % et 34 % des porteurs en Wi-Fi, soit respectivement 14 et 19 points de plus que les estimations, et 63 % et 20 % en Bluetooth (6 points au-dessus des estimations). Il y a donc *a priori* bien des échanges inter-cellules, qui permettent déjà de compenser en partie l'inactivité des points de convergence passifs.

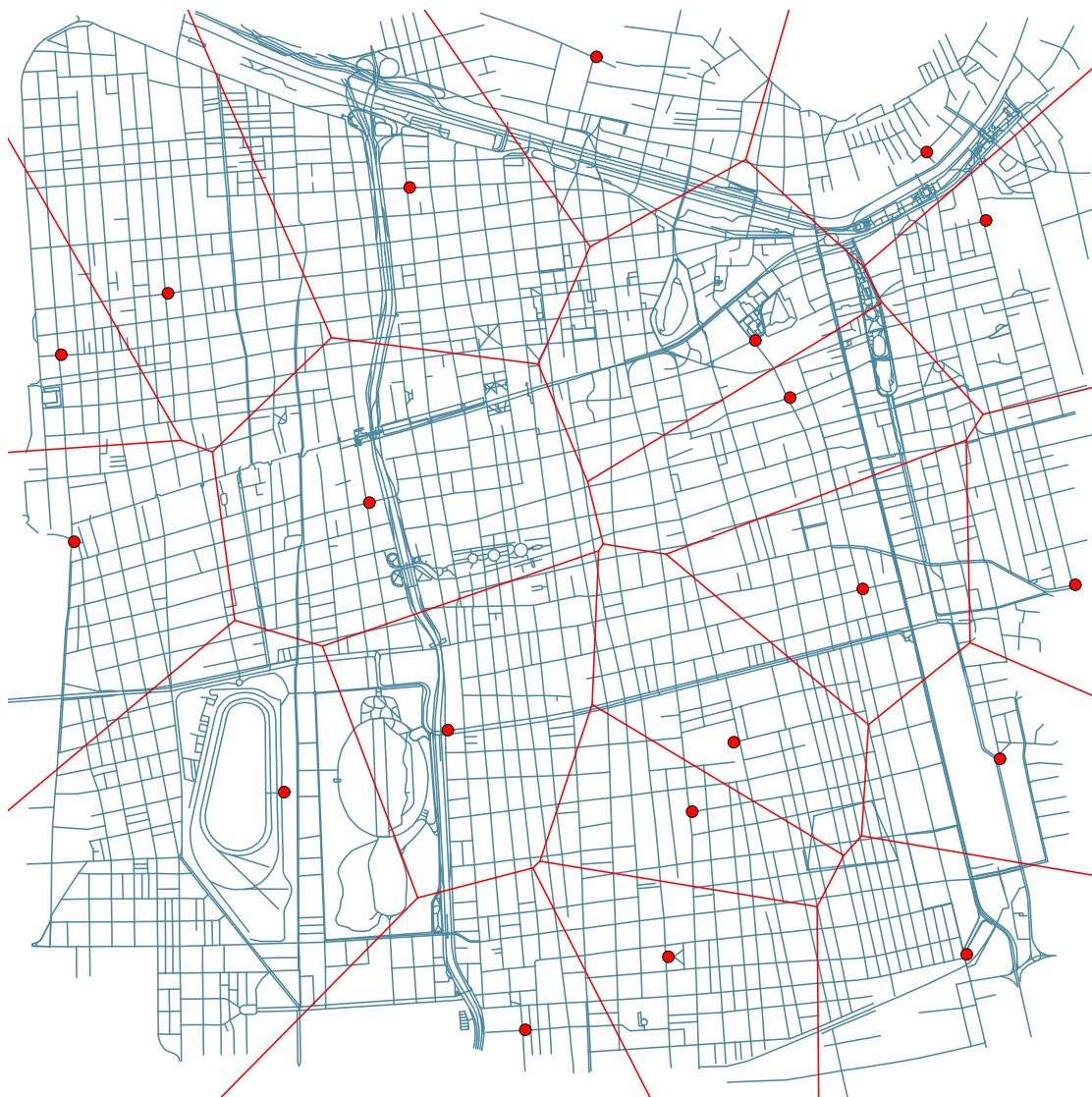


FIGURE 4.3 – Diagramme de Voronoï des points de convergence

Un diagramme de Voronoï est une partition du plan en cellules correspondant aux points d'un ensemble donné –ici les points de convergence. Pour chaque PC P , la cellule de Voronoï associée à P est l'ensemble des points qui sont plus proches de P que de tout autre PC.

4.3 Interfaces et protocoles : performances de collecte

Dans cette section, nous étendons notre évaluation aux quatre combinaisons possibles d’interfaces et protocoles de routage : Epidemic / Spray and Wait, sur interfaces Wi-Fi / Bluetooth . Les performances du système sont mesurées selon les différentes métriques définies en section 3.4.4. Ces métriques sont elles-mêmes évaluées, et les plus représentatives sélectionnées pour les tests suivants.

Enfin, l’utilisation d’interfaces intermittentes est évaluée.

4.3.1 Métriques

Les figures 4.4 et 4.5 présentent les résultats suivant les métriques d’évaluation des performances de collecte. Contrairement aux premiers résultats de la section précédente, les résultats obtenus pour les porteurs immobiles, qui présentent un intérêt particulier, sont représentés séparément de ceux des porteurs mobiles.

Proportion de nœuds connus Les graphiques supérieurs (a-d) de la figure 4.4 donnent l’évolution de la proportion de nœuds connus, mobiles et immobiles, dont nous avons analysé les premières valeurs (Epidemic seulement) dans la section précédente. Cette métrique mesure les résultats concrets du système dans l’hypothèse de hotspots interconnectés, en fournissant le nombre de porteurs mobiles et immobiles localisés et le temps nécessaire à leur localisation.

Mesure des liens de connaissance hotspot / porteur La position d’un porteur peut être acheminée vers plus d’un hotspot. La mesure de la somme des nombres de porteurs connus par chaque hotspot –les liens de connaissance hotspot / porteur–, vise à estimer cette redondance de transmission des données parmi les hotspots. Cette information est utile pour quantifier l’acheminement de données à des hotspots autres que le point de convergence de chaque porteur, mais aussi pour évaluer l’impact que pourrait avoir sur le système la défaillance d’un hotspot ou de leur interconnexion.

Ces cas sont cependant déjà pris en compte par la présence de points de convergence non-hotspots. Cette métrique apporte par ailleurs peu d’information supplémentaire : comme le montrent les figures 4.4e à h, l’allure et l’ordre des courbes sont semblables à celles des proportions de porteurs connus. Une exception notable est la forte croissance observable à 0 h 45 min sur une partie des courbes, qui correspond à une arrivée massive d’informations sur l’un des hotspot. Dans la majorité des scénarios où ce pic est observé, les informations concernées étaient déjà connues d’un autre hotspot : le nombre de porteurs connus reste donc inchangé, contrairement au nombre de liens qui reflète alors l’augmentation de la redondance.

Cette redondance, que semble capturer la proportion des liens de connaissance, est difficile à analyser. Dans la situation quasi-idéale où chaque porteur est connu d’exactly un hotspot, on obtiendrait seulement –avec nos 3 hotspots– un tiers de liens de connaissance. Mais à l’inverse, l’existence d’un tiers des liens ne garantit la connaissance

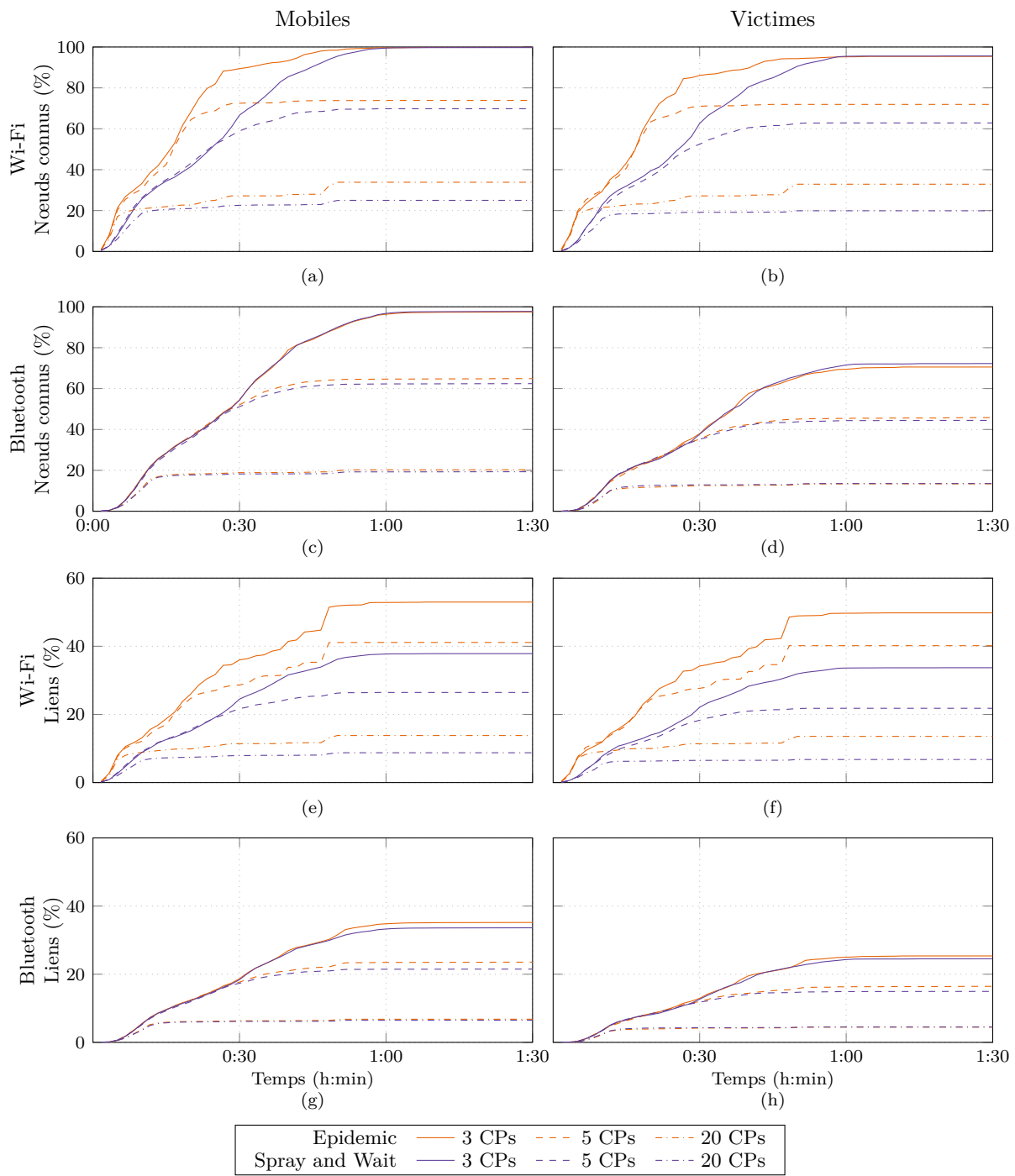


FIGURE 4.4 – Scénario de référence : Epidemic vs. Spray and Wait
– Proportion de porteurs connus, et proportion des liens de connaissance
hotspot / porteur

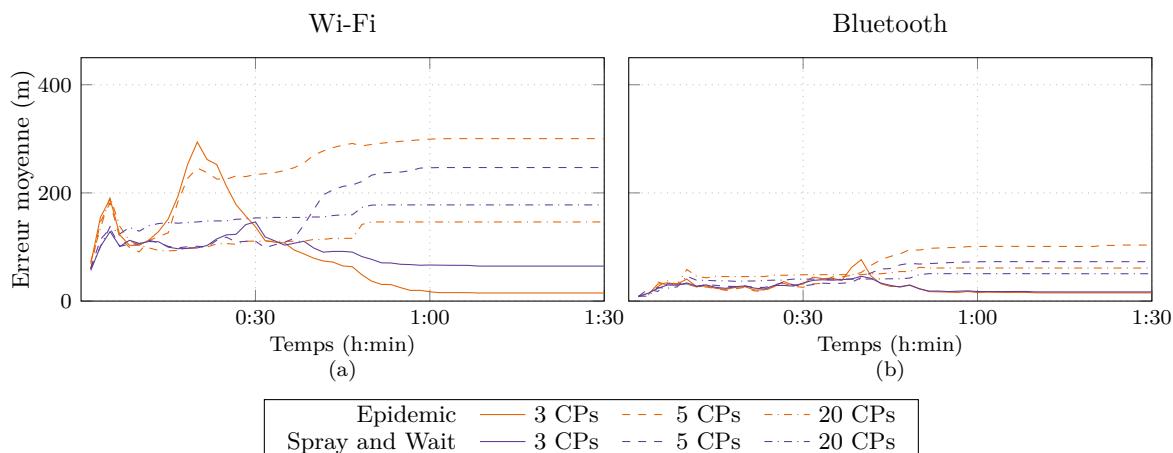


FIGURE 4.5 – Scénario de référence : Epidemic vs. Spray and Wait
– Erreur moyenne de localisation

que d'un neuvième des porteurs dans le pire cas. Même combinée à la mesure des porteurs connus, cette métrique ne permet d'évaluer la redondance que très approximativement.

L'erreur moyenne représentée dans la figure 4.5, pourrait donner des informations sur la perte de précision induite par le déplacement des porteurs et les délais d'acheminement des données. Cette métrique est cependant difficilement inexploitable, pour plusieurs raisons. On peut d'abord noter que les porteurs immobiles ne sont pas concernés : puisqu'ils sont parfaitement statiques et que la position émise par leur terminal est exacte, cette position, à partir du moment où elle parvient aux hotspots, est connue avec une erreur nulle.

Les porteurs qui ne sont pas localisés par le système ne sont pas pris en compte non plus ; ainsi, un système qui localise peu de porteurs, mais avec une bonne précision, obtiendra de meilleurs résultats sur cette métrique qu'un système plus performant qui, en plus de ces porteurs « faciles », parviendrait à localiser, avec une moins bonne précision, des personnes supplémentaires. C'est sans aucun doute ce qui explique les inversions apparentes que l'on peut observer entre les courbes (par exemple avec 5 PC) par rapport aux résultats obtenus en proportion de porteurs connus.

La forme chaotique des courbes en début de scénario confirme d'ailleurs ce biais : chaque pic d'erreur correspond à l'arrivée aux hotspots d'informations supplémentaires – d'une précision certes moindre – dont l'erreur est compensée plus tard par l'arrivée d'autres données plus précises, qui ne concernent d'ailleurs pas forcément les mêmes porteurs. Avec les 3 hotspots seulement, on a ainsi une erreur moyenne importante au début, qui baisse ensuite progressivement jusqu'à la fin du scénario au fur et à mesure de l'arrivée des informations mises à jour. Avec 5 et 20 points de convergence au contraire, l'erreur, faible au début, croît avec l'arrivée d'informations sur les porteurs se dirigeant vers des PC non communicants, dont la position a été collectée sur le chemin avant qu'ils

n'arrivent à leur point de convergence.

Nous nous concentrerons donc sur les proportions de porteurs mobiles et immobiles connus pour évaluer les performances de notre système. La section suivante présente une analyse détaillée des graphiques correspondants de la figure 4.4.

4.3.2 Performances de collecte

On peut tout d'abord constater, sans grande surprise, que les porteurs mobiles sont toujours favorisés par rapport aux immobiles. Avec 3 points de convergence et un routage Epidemic – les paramètres les plus favorables –, le ratio de porteurs connus est ainsi inférieur de 4 points pour les porteurs immobiles avec des interfaces Wi-Fi, et de 27 points en Bluetooth.

Interface Comme nous l'avions déjà observé (section 4.2.1), la grande portée des interfaces Wi-Fi (fig. 4.4a-b) permet d'atteindre de meilleurs résultats qu'en Bluetooth : avec 3 PC, les meilleurs chiffres avec Bluetooth (Bluetooth / Epidemic) sont en dessous du pire cas Wi-Fi (Wi-Fi / Spray and Wait) de ~ 2 points pour les porteurs mobiles, 25 pour les immobiles. L'écart est particulièrement marqué pour les porteurs immobiles, qui ne peuvent compter que sur le passage d'un porteur mobile à portée de signal pour transmettre leur position : la portée plus faible du Bluetooth amoindrit considérablement leurs chances.

L'ajout de points de convergence creuse aussi l'écart pour les porteurs mobiles pour des raisons analogues : les porteurs se déplaçant vers un PC non communicant dépendent eux aussi d'autres porteurs – en particulier des porteurs en déplacement vers les hotspots. Or comme nous l'avons vu, des porteurs en déplacement vers des points de convergence différents s'éloignent les uns des autres et ont peu de chances de se croiser. La portée du signal a donc un impact déterminant sur les possibilités de transmission des données des porteurs mobiles.

Cet effet est moins évident pour les porteurs immobiles, dont l'écart, en valeur absolue, semble plutôt décroître. C'est oublier qu'ils sont largement défavorisés en Bluetooth, même avec seulement les 3 hotspots. Si on normalise les valeurs par rapport à ce cas de référence¹, on constate que les porteurs immobiles localisés avec 5 et 20 PC représentent respectivement 75 % et 35 % des porteurs localisés avec 3 PC en Wi-Fi, contre 65 % et 19 % en Bluetooth. Sur ces valeurs relatives, on observe bien une croissance de l'écart (respectivement 10 et 16 points pour 5 et 20 PC), du même ordre que pour les porteurs mobiles (7 et 13 points).

Protocole de routage Les deux protocoles Epidemic et Spray and Wait donnent des résultats similaires sur interfaces Bluetooth (fig. 4.4c-d, mais Epidemic se montre légèrement meilleur que Spray and Wait sur Wi-Fi : le nombre de porteurs localisés – autant mobiles qu'immobiles – est supérieur.

1. ce qui revient à calculer le *risque relatif*

Epidemic semble aussi plus résistant à la dispersion des porteurs due aux points de convergence supplémentaires, au bénéfice surtout des porteurs immobiles : alors que les deux protocoles atteignent $\sim 99\%$ de porteurs connus ($\sim 100\%$ des mobiles, $\sim 95\%$ des immobiles) avec 3 points de convergence, Spray and Wait en manque $\sim 5\%$ de plus qu'Epidemic avec 5 points de convergence, et $\sim 10\%$ avec 20. Cette dégradation des performances en Spray and Wait s'explique facilement par les contraintes du protocole : de « bons relais » peuvent être manqués par manque de copies, et sa phase *Wait* limite la transmission, ralentissant l'acheminement.

On peut d'ailleurs observer que le temps de stabilisation du système est plus court de 10~15 min avec Epidemic, quel que soit le nombre de points de convergence : avec Spray and Wait, des messages sont bloqués en phase d'attente jusqu'à ce que leur porteur atteigne un hotspot, alors qu'Epidemic aurait pu les relayer.

4.3.3 Efficacité énergétique

Comme pour les performances de collecte, nous discutons ici la pertinence des métriques proposées en section 3.4.4 pour l'évaluation de l'efficacité énergétique du système.

La figure 4.6 présente les résultats obtenus pour les métriques de consommation : nombre moyen de messages envoyés par porteur, volume moyen des données envoyées par porteur et nombre moyen de messages envoyés par porteur *localisé*.

Quels que soient les interfaces et protocoles utilisés, la consommation, en nombre de trames et en volume de données, décroît avec l'ajout de points de convergence : en réduisant les possibilités de communication, la dispersion des porteurs a un impact direct sur la consommation.

Bluetooth donne de bien meilleurs résultats que Wi-Fi en termes de consommation énergétique, avec moins de 30 trames envoyées par porteur en moyenne (fig. 4.6b), et ce quel que soit le protocole de routage : même si Epidemic provoque presque deux fois plus d'envois de messages que Spray and Wait, la transmission est limitée par la portée des interfaces plus que par le choix du protocole.

Au contraire, avec la grande portée des interfaces Wi-Fi, la consommation énergétique devient plus importante (fig. 4.6a) : environ 20 fois plus de trames qu'en Bluetooth. La portée peut aussi avoir son importance pour le choix du protocole, puisque Spray and Wait consomme dans ce cas trois à cinq fois moins qu'Epidemic – en terme de nombre de messages.

Les courbes de volume de données envoyées (fig. 4.6c et d) ont globalement la même allure mais l'écart entre Wi-Fi et Bluetooth est plus nuancé : si les volumes échangés en Wi-Fi, tout autre paramètre identique, sont toujours plus importants avec un rapport de l'ordre de ~ 50 , les volumes échangés par Epidemic sur Bluetooth sont du même ordre de grandeur, voire supérieurs, à ceux de Wi-Fi/Spray and Wait. Spray and Wait réduit donc la fréquence d'envoi des trames – d'un facteur 2 à 6 « seulement » –, mais aussi et surtout leur volume : de 20 à 45 fois en Bluetooth, 200 à 400 fois en Wi-Fi.

Spray and Wait permet ainsi une réduction significative de la consommation énergétique sur interfaces Wi-Fi avec une perte en performance relativement acceptable, en particulier lorsque les points de convergence non-hotspots sont peu nombreux. Spray

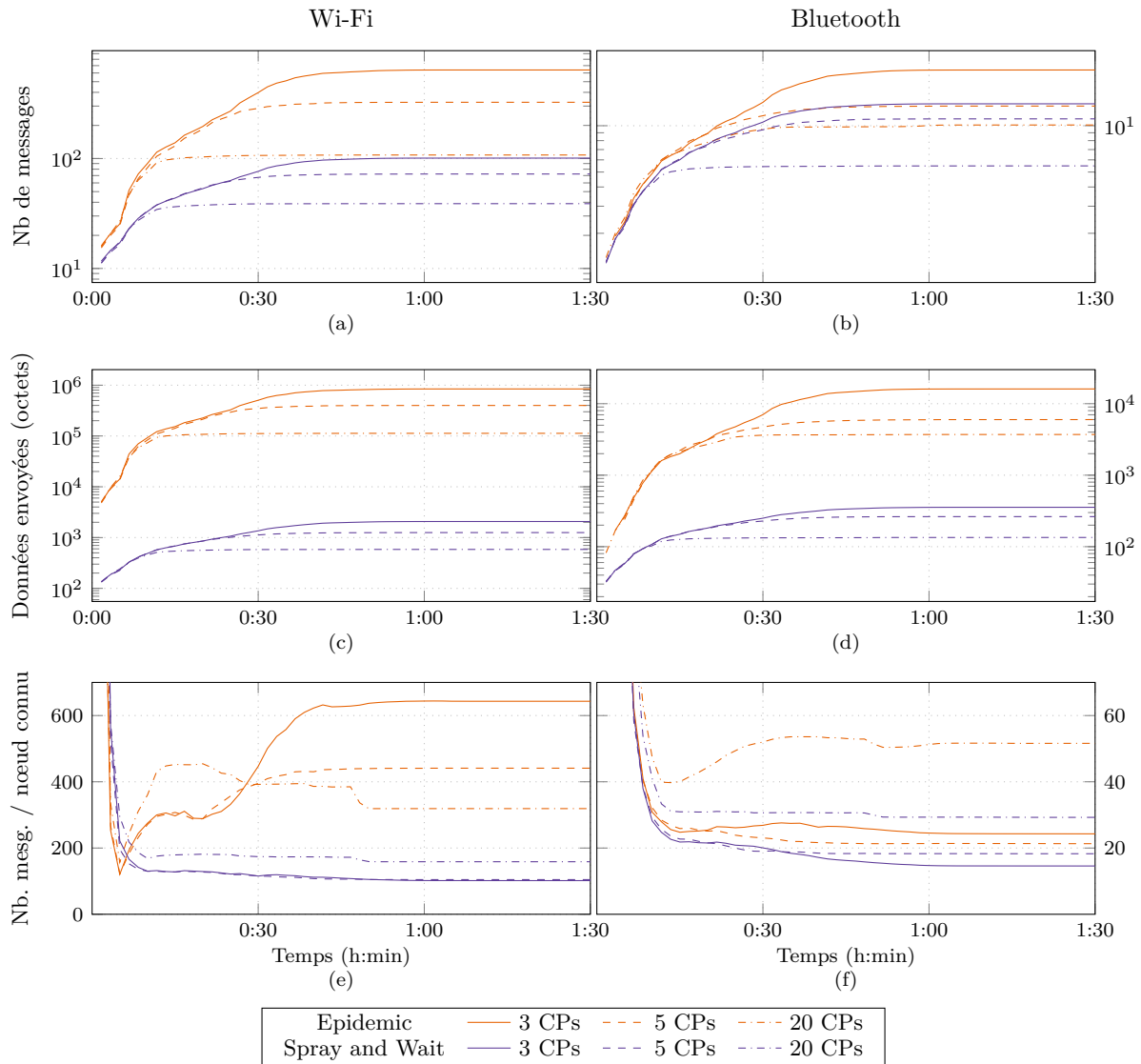


FIGURE 4.6 – Scénario de référence : Epidemic vs. Spray and Wait – Consommation énergétique

TABLEAU 4.3 – Scénario de référence – valeurs en fin de simulation

Référence		Nb PC	Mobiles	Tous	Victimes	Stab.	nMesg	sData
Wi-Fi	Epidemic	3	99.8%	99.3%	95.4%	0:46	638.9	8.43e5
		5	73.9%	73.7%	71.9%	0:30	324.9	3.99e5
		20	33.8%	33.8%	32.9%	0:50	107.7	1.13e5
	SnW	3	99.7%	99.3%	95.6%	0:55	100.9	2.07e3
		5	69.8%	69.1%	62.9%	0:45	72.3	1.25e3
		20	25.0%	24.5%	19.9%	0:50	38.9	5.85e2
	Epidemic	3	97.6%	94.9%	70.6%	0:58	23.0	1.61e4
		5	65.0%	63.1%	45.9%	0:46	13.4	6.00e3
		20	20.3%	19.6%	13.4%	0:51	10.3	3.73e3
	SnW	3	97.9%	95.3%	72.3%	0:58	13.9	3.56e2
		5	62.5%	60.7%	44.6%	0:46	11.1	2.63e2
		20	19.3%	18.8%	13.6%	0:51	5.5	1.35e2

Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

and Wait pourrait donc être considérée une alternative intéressante sur interfaces Wi-Fi. Étant donnée la faible consommation d'Epidemic sur Bluetooth, choisir Spray and Wait y semble au contraire inutile : les deux protocoles peuvent être utilisés indifféremment, avec des résultats légèrement meilleurs pour Epidemic.

Plus délicate à analyser, la mesure du nombre de message par porteur connu (fig. 4.6e et f) confirme cette observation : en Wi-Fi, l'usage de Spray and Wait fait chuter significativement le nombre de messages par porteur connu par rapport à Epidemic, un effet moins prononcé en Bluetooth, où la baisse de consommation s'accompagne d'une importante baisse des performances de localisation. Les scénarios à 20 hotspots (sur Bluetooth) semblent faire exception, avec un ratio proche de 2 entre Epidemic et Spray and Wait. Cet écart visible est cependant imputable aux piètres performances du système en terme de nombre de porteurs localisés dans ces conditions, tant avec Epidemic qu'avec Spray and Wait, qui donne à une faible variation du nombre de message un impact disproportionné sur la mesure. L'économie d'énergie est en réalité presque négligeable dans ce cas.

Les choix de protocoles devraient évidemment être adaptés au cas par cas, en fonction des objectifs de performance et des contraintes de consommation, mais ces premiers résultats semblent déjà montrer que les combinaisons Wi-Fi / Spray and Wait et Bluetooth / Epidemic peuvent constituer des compromis intéressants.

Pour toute la suite de notre étude, le système sera évalué à l'aide des métriques que nous venons de sélectionner : proportions de porteurs mobiles et immobiles localisés pour les performances de localisation, nombre de trames et volume moyen transmis par nœud du réseau pour l'efficacité énergétique. Les valeurs exactes en fin de simulation pour le scénario de référence, correspondant aux figures 4.4a-d et 4.6a-d, sont reportées dans le tableau 4.3. Le temps de stabilisation à 98 % est le temps nécessaire, dans chaque jeu de paramètre, pour que la proportion de porteurs localisés (mobiles et immobiles confondus) atteigne 98 % de sa valeur finale.

Les deux chapitres suivants présentent l'ensemble des résultats d'évaluation du système,

Chapitre 5

Résultats

Cette thèse a débuté dans le cadre d'un projet en collaboration avec le laboratoire d'informatique de l'université de Santiago au Chili – une région du monde sujette à de fréquents séismes. Nous espérions alors pouvoir obtenir des traces de mobilité réelle, comme on peut en trouver en accès libre [88] mais correspondant plus spécifiquement à notre scénario : une situation de crise, idéalement des traces de mobilité relevées après un séisme. Ces traces nous auraient permis de tester directement notre architecture, par simulation, sur les données de mobilité réelle, mais aussi d'améliorer et de valider la pertinence de notre modèle de mobilité. Nous n'avons finalement pas réussi à obtenir de telles traces : les très rares jeux de données conformes à nos besoins sont principalement détenus par des entreprises de télécommunications – les seules ayant les moyens de produire simplement ces traces –, peu enclines à les partager.

Nous avons donc décidé, à partir de notre modèle de mobilité, d'évaluer l'impact des différents paramètres sur le fonctionnement et les performances de notre architecture de géolocalisation. Il est évidemment impossible de tester, et a fortiori de présenter, toutes les valeurs et combinaisons possibles de tous les paramètres de mobilité et de communication, même en se limitant à avec un modèle de mobilité relativement simple comme *Danger Movement* et des protocoles de routage comme Epidemic et Spray and Wait. C'est donc une sélection de paramètres et de valeurs évalués que nous présentons ici.

À partir du scénario de référence, plusieurs paramètres concernant la mobilité, le matériel et les protocoles sont ensuite indépendamment modifiés afin d'évaluer leur incidence sur les performances.

Dans ce chapitre, on considère fixes les proportions respectives de personnes mobiles, fortement majoritaires, et immobiles : la catastrophe fait relativement peu de victimes, et les rescapés décident tous ou presque de rejoindre un point de convergence.

5.1 Interfaces intermittentes

Nous avons ensuite relancé des simulations sous les mêmes ensembles de paramètres, à l'exception des interfaces, cette fois intermittentes.

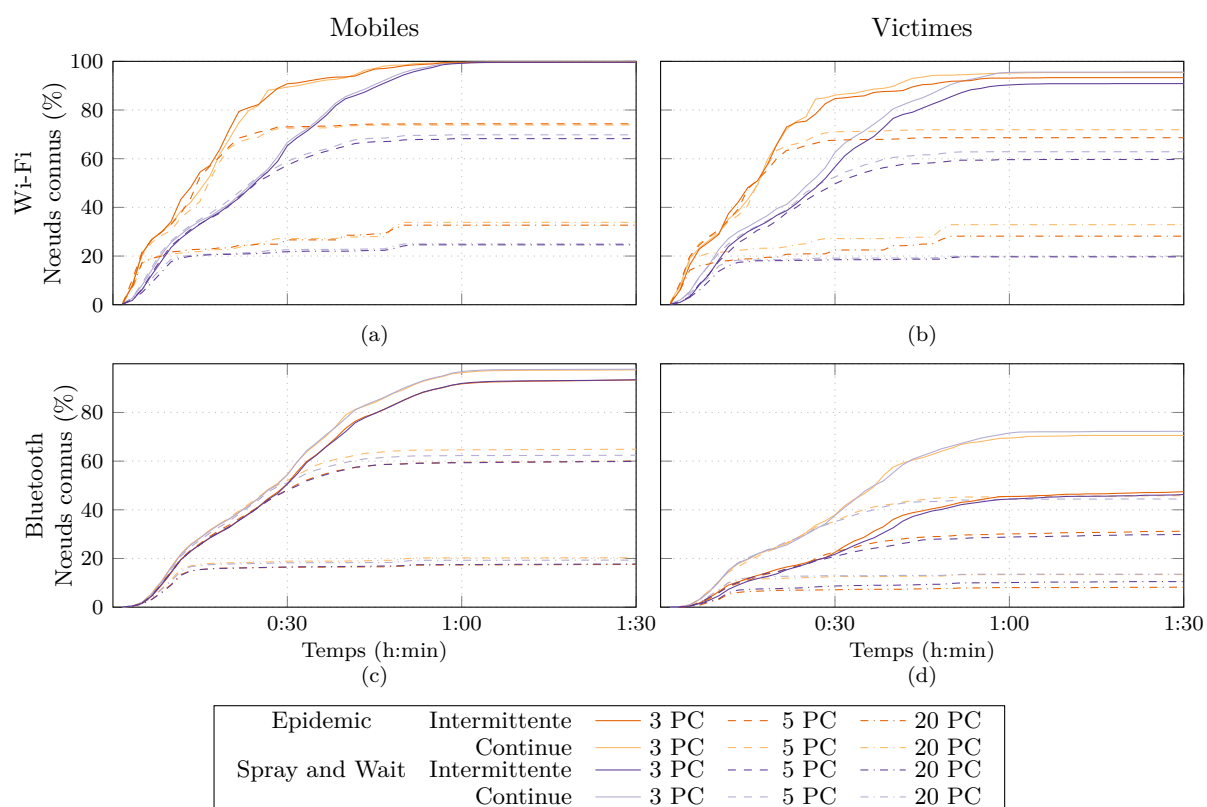


FIGURE 5.1 – Interfaces intermittentes – Proportion de porteurs connus

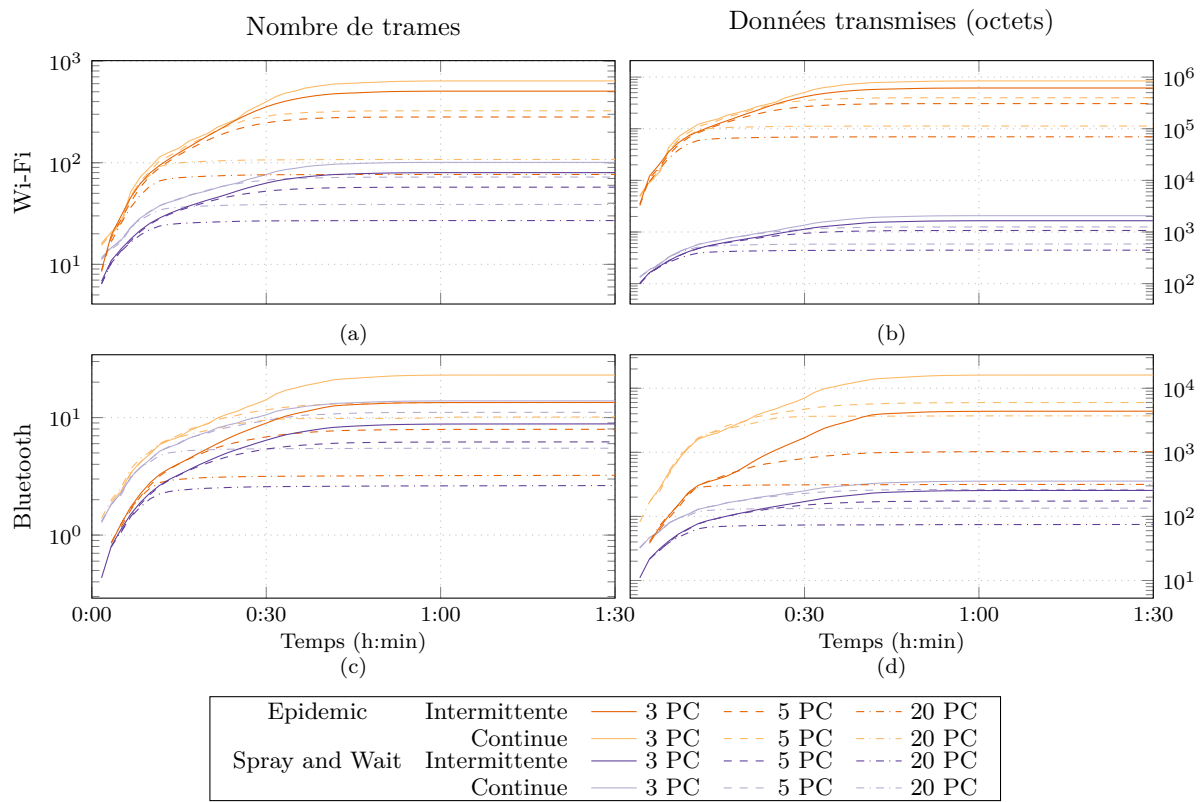


FIGURE 5.2 – Interfaces intermittentes – Consommation énergétique

Les figures 5.1 et 5.2 présentent les résultats d'évaluation des interfaces intermittentes; le tableau des valeurs en fin de simulation est en annexe. Avec une interface Wi-Fi, en Epidemic comme en Spray and Wait, l'intermittence n'a qu'un impact faible sur le nombre de porteurs immobiles connus ($\sim 2\%$) et négligeable sur les porteurs mobiles, mais réduit le nombre de messages moyen de 13% à 30% et le volume de données échangées de 15% à 38% , selon les paramètres.

Les interfaces Bluetooth voient par contre leurs performances dégradées par les interruptions de communications, avec un gain quasi nul en termes de nombre de messages : le gain relatif est certes important, mais présente peu d'intérêt au vu des quantités en jeu. La différence reste raisonnable pour les porteurs mobiles, mais inacceptable pour les immobiles : Dans le meilleur scénario par exemple – Epidemic avec 3 PC –, on passe de 71% de victimes localisées à seulement 50% en utilisant des interfaces intermittentes.

L'intermittence pourrait donc représenter un compromis intéressant pour réduire la consommation sur une interface Wi-Fi. Même en prenant en compte la réduction de consommation en écoute (qui s'ajoute à la réduction des transmissions), elle ne présente cependant aucun intérêt *a priori* sur une interface Bluetooth, déjà bien plus économe.

5.2 Mobilité

Nous nous intéressons dans cette section à la mobilité des porteurs : à partir du scénario de référence, nous avons modifié les valeurs de plusieurs paramètres liés aux déplacements.

5.2.1 Vitesse de marche

Les premières expérimentations portent sur la vitesse des porteurs. Dans le scénario de référence, la mobilité est simplifiée : leur vitesse de déplacement est constante et fixée à $1,3 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 4,7 \text{ km/h}$) pour tous les porteurs *mobiles*. Or les personnes se déplacent en réalité à des vitesses différentes, et variables au cours du temps, selon l'état du terrain, leur état de santé ou de fatigue, leurs interactions, les événements extérieurs, etc. Toutes ces variations peuvent avoir une influence sur les contacts et leurs durées. Ces simulations devraient nous permettre d'évaluer les effets de ces variations à l'échelle du système, et de valider la pertinence de notre simplification initiale.

Nous avons donc gardé les paramètres du tableau 4.2 à l'exception de la vitesse de déplacement des porteurs, tirée aléatoirement entre $0,7 \text{ m s}^{-1}$ à $2,0 \text{ m s}^{-1}$. ($2,5 \sim 7,2 \text{ km/h}$). Les résultats sont présentés en figures 5.3 et 5.4. Du fait de limitations du simulateur ONE, les simulations avec 3 PC, des interfaces Wi-Fi, un routage Epidemic, et une vitesse de déplacement variable n'ont pas pu aboutir. La courbe correspondante dans les figures figure 5.3 et 5.4 est donc manquante. Vu les résultats obtenus sur ce jeu de paramètre avec une vitesse de déplacement fixe –excellentes performances de localisation et consommation énergétique importante–, et l'impact global de la vitesse variable sur les autres simulations, l'absence de ces valeurs ne devrait pas perturber l'analyse.

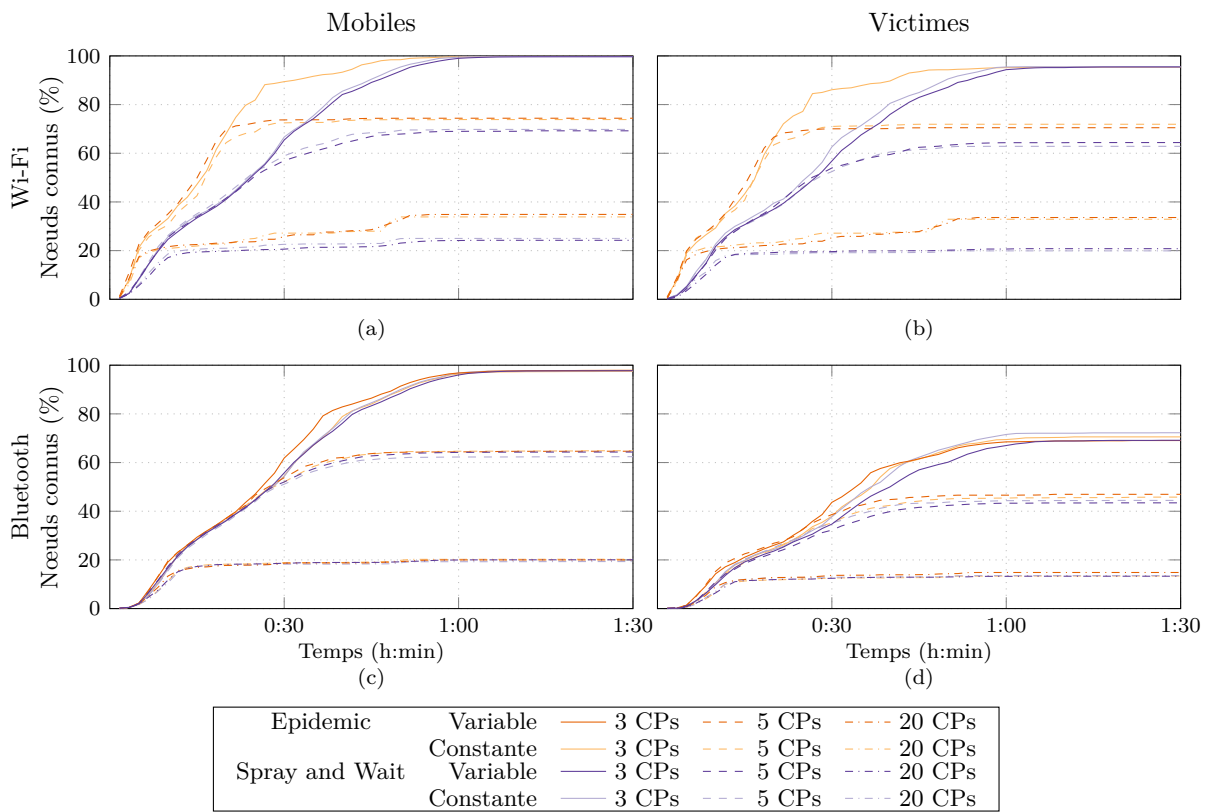


FIGURE 5.3 – Vitesse de marche variable – Proportion de porteurs connus

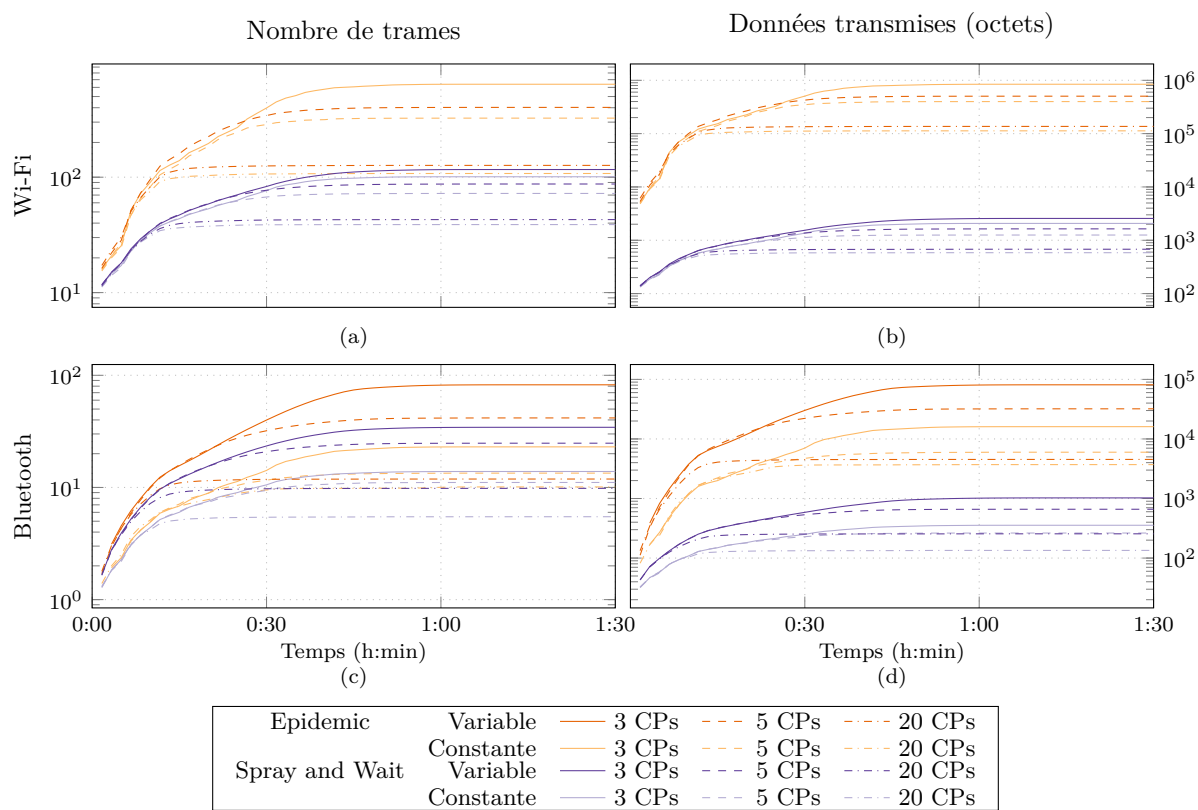


FIGURE 5.4 – Vitesse de marche variable – Consommation énergétique

Les performances de localisation (fig. 5.3) sont très peu affectées par la vitesse de déplacement variable des porteurs : la vitesse moyenne étant inchangée, l'ensemble des contacts de chaque porteur reste similaire – le multi-saut compense les faibles variations.

Les variations de vitesses ont cependant bien un impact sur la suite des contacts à petite échelle. L'hétérogénéité des vitesses entre les porteurs et au cours du temps les mène à s'approcher et s'éloigner aléatoirement les uns des autres favorisant les connexions / déconnexions successives, ce qui déclenche l'envoi de trames supplémentaires. Cet effet est mis en évidence par l'augmentation du nombre de trames échangées (fig. 5.4) observable sur tous les scénarios, en particulier en Bluetooth. Notre mobilité approchée, à vitesse constante, mène donc à une sous-estimation de la consommation, mais sans impact sur les performances de collecte.

5.2.2 Choix du point de convergence

Nous avons modifié pour cette section les paramètres de mobilité en altérant le choix du point de convergence. Jusqu'ici, chaque porteur conscient de la situation se dirigeait vers le PC le plus proche de sa position. Ce comportement peut être conforme à certaines consignes officielles, mais n'est pas nécessairement observé en situation réelle : certaines

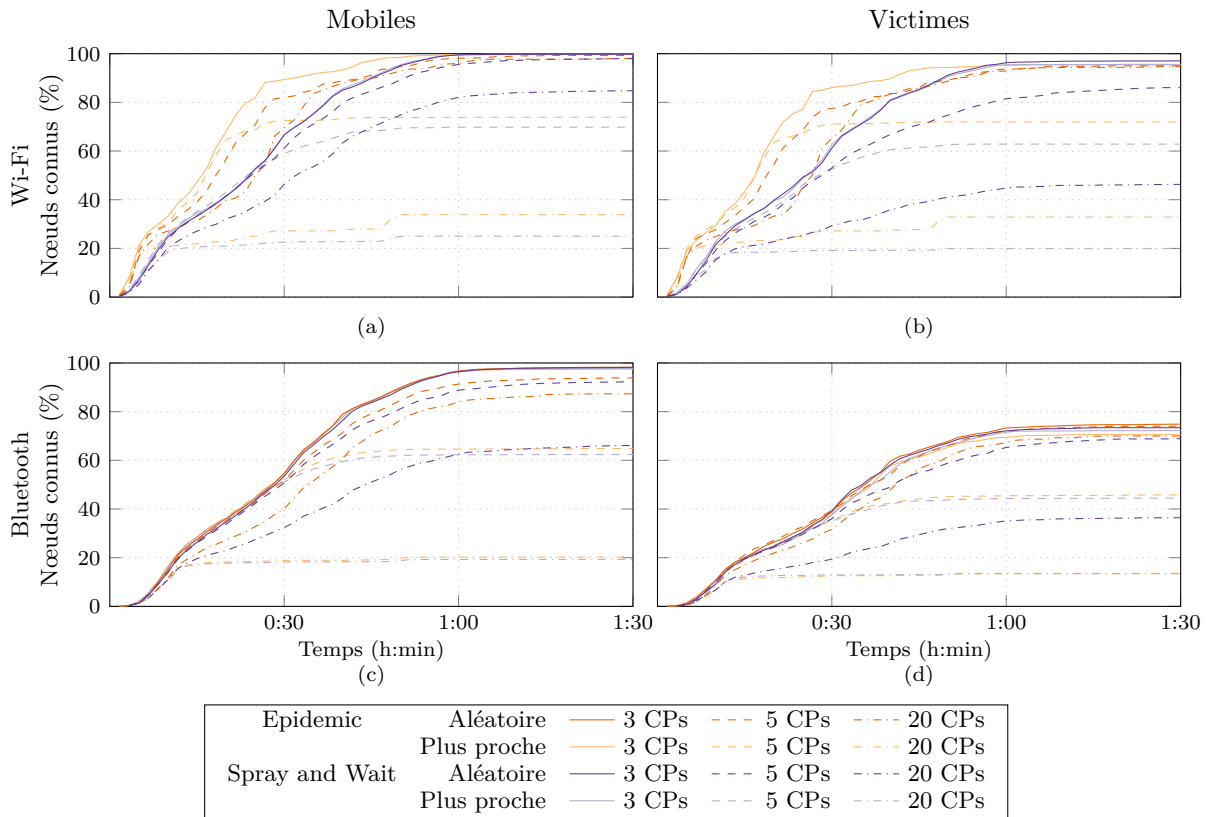


FIGURE 5.5 – Choix du point de convergence – Proportion de porteurs connus

personnes chercheront à atteindre une gare ou un aéroport pour quitter la zone, récupérer leurs enfants à l'école, ou simplement se tromperont par méconnaissance des points de convergence.

Dans les simulations suivantes, nous permettons donc à une partie des porteurs de tirer aléatoirement leur destination parmi les points de convergence, au lieu de choisir systématiquement le plus proche de leur position courante. Dans notre modèle, cela signifie que ces porteurs pourront passer d'une cellule à l'autre du diagramme de Voronoï associé aux points de convergence, et donc favoriser les échanges de données inter-cellules.

Les résultats sont présentés en figures 5.5 et 5.6, et tableau 5.1. Comme avec la vitesse de déplacement variable, les simulations avec 3 PC, des interfaces Wi-Fi et un routage Epidemic n'ont pas pu aboutir.

Avec 3 points de convergence, les performances restent sensiblement inchangées, avec un petit gain dans certains cas pour les victimes. Cependant, avec l'ajout de points de convergence (inactifs) supplémentaires, cette mobilité différente conduit à une amélioration spectaculaire des performances : jusqu'à ~ 64 points d'augmentation sur le nombre de porteurs mobiles localisés avec 20 points de convergence en Wi-Fi (fig. 5.5a, avec Epidemic), ~ 67 en Bluetooth (fig. 5.5c). En se déplaçant entre les cellules, les porteurs

TABLEAU 5.1 – Choix de PC aléatoire – valeurs en fin de simulation

		Nb de	Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData			
		PC	valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR		
Choix PC aléatoire	Wi-Fi	Epidemic	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
			5	99.3%	1.35	98.9%	1.34	95.1%	1.32	0:56	564.4	1.74	7.60e5	1.90	
			20	98.1%	2.90	97.8%	2.90	94.8%	2.88	1:01	286.9	2.66	3.73e5	3.31	
		SnW	3	99.8%	1.00	99.5%	1.00	97.1%	1.02	0:55	101.6	1.01	2.39e3	1.15	
				5	98.2%	1.41	97.0%	1.40	86.3%	1.37	1:05	85.8	1.19	1.86e3	1.49
				20	85.0%	3.40	81.1%	3.31	46.4%	2.33	1:06	54.4	1.40	1.06e3	1.82
	BlueTooth	Epidemic	3	98.4%	1.01	96.1%	1.01	74.9%	1.06	1:00	59.8	2.60	7.01e4	4.36	
			5	94.1%	1.45	92.2%	1.46	74.5%	1.62	1:05	68.6	5.11	8.31e4	13.86	
			20	87.6%	4.31	85.9%	4.38	70.3%	5.25	1:08	49.7	4.81	6.05e4	16.23	
		SnW	3	98.4%	1.00	95.9%	1.01	73.8%	1.02	1:01	17.9	1.29	5.48e2	1.54	
				5	92.6%	1.48	90.2%	1.49	69.0%	1.55	1:10	19.7	1.78	5.84e2	2.22
				20	66.3%	3.43	63.3%	3.37	36.5%	2.69	1:13	14.1	2.56	3.82e2	2.84

Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

RR : « risque relatif » par rapport au scénario de référence

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

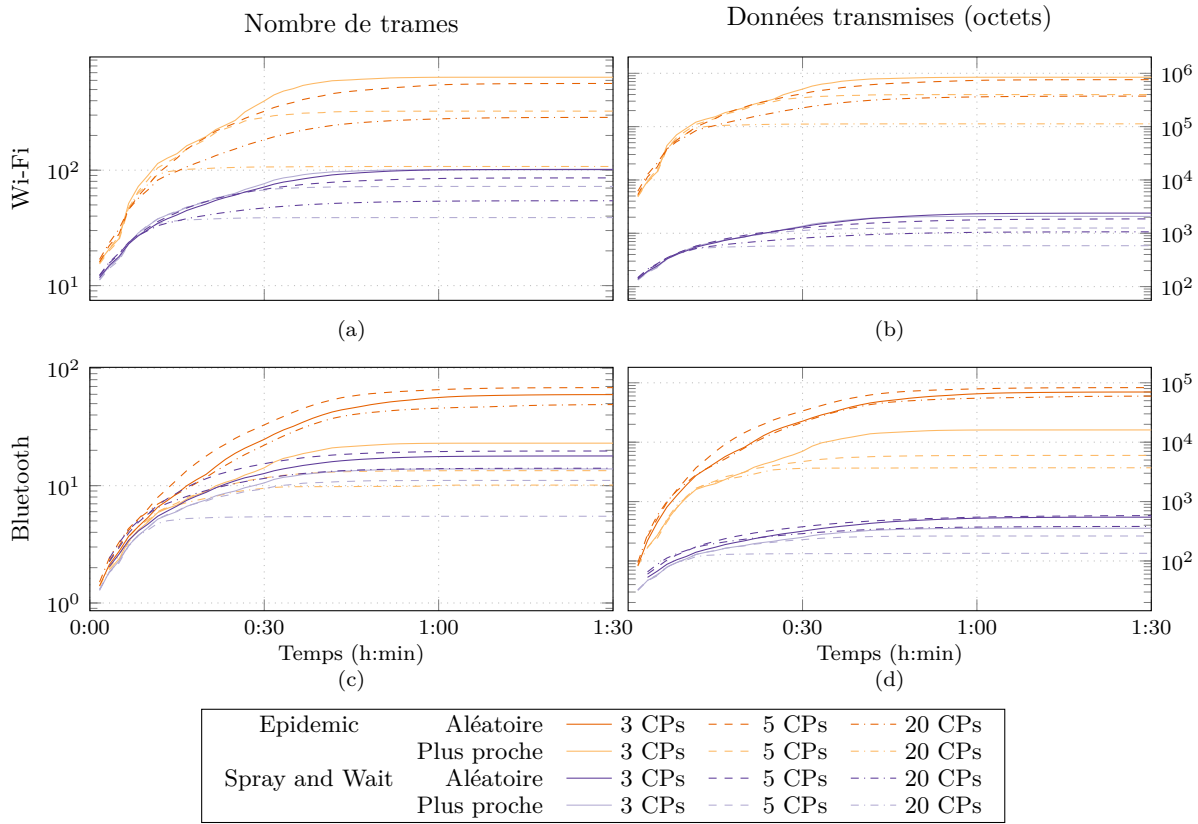


FIGURE 5.6 – Choix du point de convergence – Consommation énergétique

« divergents » disséminent les informations entre des porteurs se dirigeant vers différents points de convergence et en particulier vers les hotspots, compensant ainsi la dispersion des porteurs.

Le même effet est visible pour les porteurs immobiles (fig. 5.5b et d), qui bénéficient doublement de cette mobilité : en se dirigeant vers des points de convergence plus éloignés, les porteurs mobiles divergents empruntent des chemins qui autrement seraient restés inexplorés, donnant ainsi une chance aux victimes qui s’y trouvent de transmettre leur position. Ces informations ainsi collectées bénéficient ensuite, comme celles des porteurs mobiles, des échanges inter-cellules pour parvenir aux hotspots.

Avec un routage Epidemic, on obtient ainsi des performances relativement proches quel que soit le nombre de points de convergence. Avec Spray and Wait, l’amélioration est certes considérable, mais sans compenser totalement la dispersion. Encore une fois, la limite sur le nombre de copies de chaque message entrave ses possibilités de transmissions *via* un porteur divergent, qui ne pourra pas le collecter si aucune copie n’est disponible, et ne pourra pas le retransmettre s’il n’en dispose que d’une copie alors qu’il se rend vers un PC inactif.

On notera que ce gain en performance s’accompagne d’une augmentation significative

du nombre de trames transmises, jusqu'à un facteur 2,5 en Wi-Fi (fig. 5.6a : Epidemic, 20 PC), 5 en Bluetooth (fig. 5.6c : Epidemic, 5 PC), et d'une augmentation encore plus importante du volume de données échangées : jusqu'à 16 fois plus (fig. 5.6d : Bluetooth, Epidemic, 20 PC). Le temps de stabilisation du système se trouve aussi augmenté, de plus de 50 % dans certains cas : les porteurs divergents ont de plus grandes distances à parcourir, et peuvent être porteurs de nombreuses informations.

5.2.3 Véhicules et alerte

Afin d'améliorer un peu plus le réalisme du modèle de mobilité, nous avons encore testé deux modifications. En situation réelle, selon la nature et l'ampleur de la catastrophe, et même si le terrain peut être accidenté, la circulation automobile peut rester envisageable. Des véhicules peuvent circuler à portée de signal des autres porteurs et ainsi, si leurs occupants sont eux-mêmes porteurs d'un terminal exécutant l'application, collecter et transmettre les données – peut-être plus rapidement ou plus efficacement.

Des véhicules motorisés ont donc été ajoutés ; ils suivent les mêmes règles de mobilité que les porteurs mobiles mais se déplacent à une vitesse de 30 km h^{-1} ($8,3 \text{ m s}^{-1}$). Pour les simulations suivantes, 10 % des porteurs mobiles sont ainsi remplacés par ces nœuds rapides, d'abord sans changer les autres paramètres.

Dans un second temps nous avons essayé, toujours avec les 10 % de véhicules, de réduire de 0,8 à 0,2 la proportion $P_{pre\text{Warned}}$ des porteurs alertés dès le début de la simulation. Cette dernière modification peut sembler moins réaliste – un séisme destructeur ou une tornade passent rarement inaperçus –, mais un porteur *non alerté* peut aussi représenter une personne ignorant les consignes, l'emplacement des points de convergence, ou simplement n'ayant pas *encore* activé l'application.

Pour cette expérience, nous avons concentré nos tests sur les combinaisons de protocoles identifiées comme de bon compromis en section 4.3 : Wi-Fi / Spray and Wait et Bluetooth / Epidemic. Les figures 5.7 et 5.8, et le tableau 5.2 présentent les résultats.

L'ajout des véhicules accélère la collecte de manière significative en début de scénario, pendant environ 15 min. Passé ce délai, qui correspond sans aucun doute au temps nécessaire pour que la majorité des véhicules ait atteint leur point de convergence, la collecte reprend un rythme plus lent, de sorte que le temps de stabilisation global reste inchangé. Pour les porteurs mobiles, les véhicules n'ont par ailleurs aucun effet sur le nombre de nœuds localisés. Pour les victimes, ils semblent tout de même avoir un très léger effet, notamment en Bluetooth / Epidemic – pas toujours positif (fig. 5.7b). C'est aussi en Bluetooth qu'on observe les plus grandes différences de consommation : les quantités de trames et données transmises sont plus importantes avec les véhicules lorsqu'il y a 3 ou 5 PC, moins importantes avec 20 (fig. 5.7c-d).

On peut supposer que la mobilité rapide des véhicules permet d'accélérer la collecte tant que les véhicules sont effectivement sur le terrain, mais en prenant le risque de manquer des échanges : la vitesse réduit les temps de contact, en particulier avec les porteurs immobiles. Cet effet est renforcé par la faible portée du Bluetooth. À cela s'ajoutent les problèmes de dispersion, qui n'épargnent pas les véhicules : sur des scénarios où le nombre de porteurs se dirigeant vers un hotspot est faible, les échanges manqués par

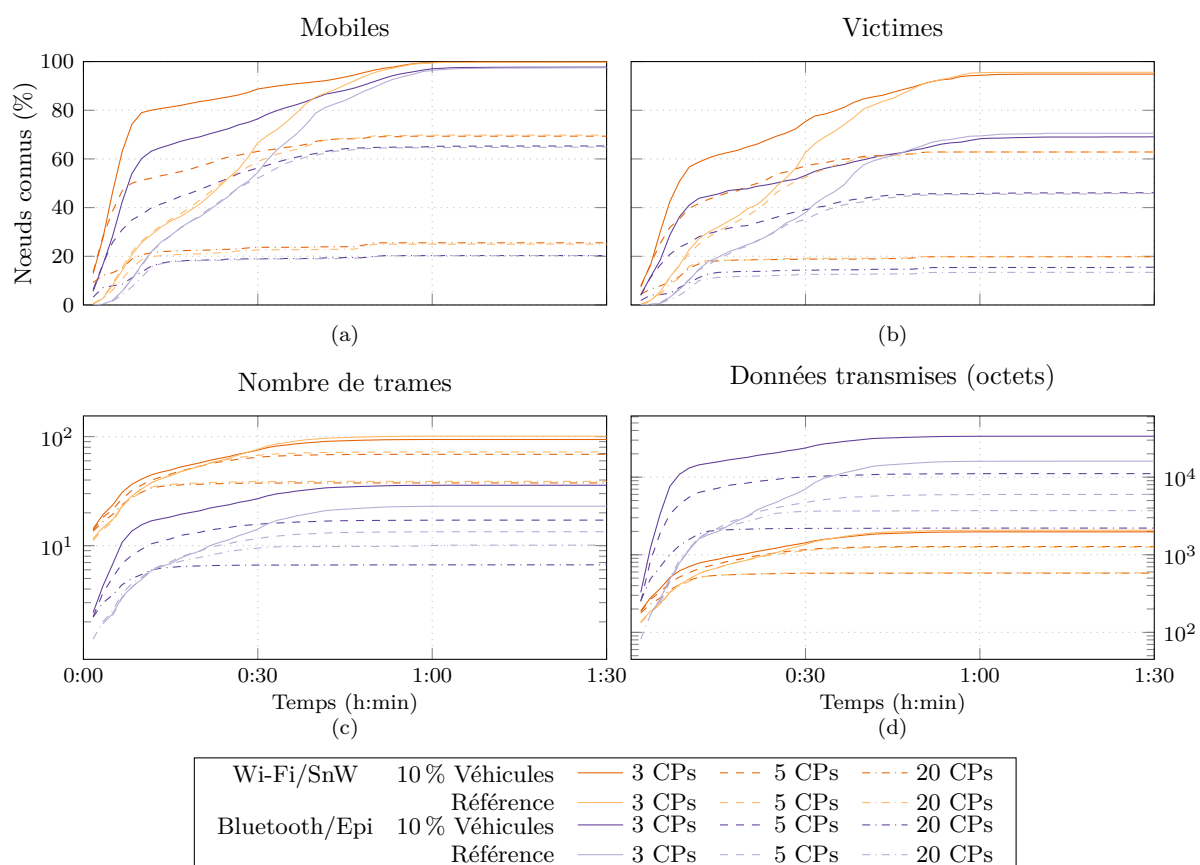
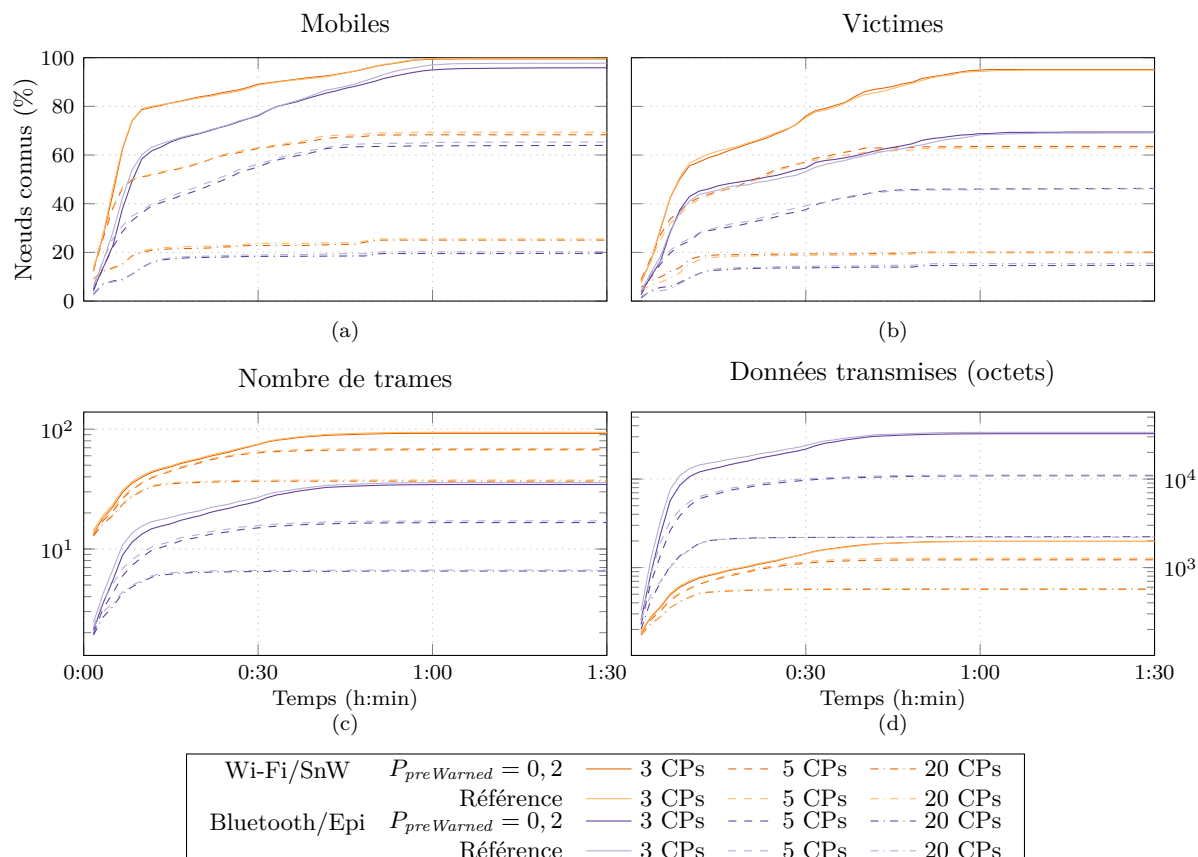


FIGURE 5.7 – Véhicules (30 km h^{-1})

FIGURE 5.8 – $P_{preWarned} = 0,2$

les véhicules ne peuvent pas tous être compensés par les porteurs piétons. Ces échanges manqués expliquent aussi la légère baisse de consommation dans le cas 20 points de convergence.

Il serait certainement bénéfique au système de disposer de véhicules sur toute la durée du scénario. Étant donné leur mobilité dans notre modèle, convergente et sans détour, il faudrait pour cela que les véhicules soient alertés plus tard, ou du moins de manière plus progressive. C'est aussi pour cette raison que nous avons tenté de réduire la valeur de $P_{preWarned}$ – pour tous les porteurs, pour ne pas créer d'inégalités artificielles.

La réduction de $P_{preWarned}$, qui aurait pu défavoriser l'ensemble des porteurs en retardant leur prise de conscience de la crise, a finalement peu d'effet sur les scénarios testés. Étrangement, il semblerait même que les victimes bénéficient globalement de ce retard, peut-être parce qu'il favorise les déplacements aléatoires, permettant ainsi aux porteurs mobiles d'« explorer » la zone avant de se rendre aux points de convergence. Ces variations sont toutefois peu significatives.

Ces résultats sur l'ajout de véhicules rapides mettent en évidence une limitation

importante de notre modèle de mobilité : du fait de la mobilité convergente des porteurs, et de leur désactivation à l'arrivée au point de convergence, la durée de présence de chacun dans le réseau est limitée. Pour les véhicules en particulier, cette mobilité limite considérablement leur contribution au réseau.

5.3 Conclusion

Avec cette première évaluation, nous avons pu sélectionner des métriques exploitables pour évaluer et comparer les performances et l'efficacité énergétique de notre architecture sur les différents scénarios testés. Nous proposons aussi une première analyse quantitative des effets de la présence de points de convergence inactifs et de la dispersion de l'information parmi eux.

Les simulations présentées dans ce chapitre ont ensuite révélé des caractéristiques sensiblement communes à tous les scénarios, comme le temps de stabilisation du système. Selon les paramètres, nous avons obtenu des performances variant de $\sim 15\%$ à $99,5\%$ de porteurs localisés, avec toujours un désavantage pour les victimes. Le choix des interfaces de communication sans fil et du protocole de routage, comme la présence et le nombre de points de convergence inactifs, ont bien aussi un impact significatif que nous avons pu mesurer. Bien que l'utilisation d'Epidemic sur interfaces Wi-Fi reste la solution la plus performante sur tous les scénarios en terme de nombre de personnes localisées, les combinaisons Wi-Fi / Spray and Wait et Bluetooth / Epidemic apparaissent dans ces résultats comme des compromis dignes d'intérêt lorsque la consommation énergétique devient un facteur limitant.

Les différents tests ont par ailleurs permis d'évaluer l'intérêt des interfaces intermittentes et leur impact sur les performances de localisation et sur la consommation énergétique – Nous avons ainsi pu écarter son usage sur des interfaces Bluetooth. Les tests sur la vitesse de déplacement des porteurs ont permis de vérifier la faible sensibilité du système aux variations de mobilité à petite échelle. Mais les résultats les plus intéressants que nous avons obtenus concernent l'ajout de porteurs divergents, qui par leur mobilité introduisent une forme de brassage aléatoire des données parmi les porteurs, permettant de compenser presque totalement l'isolement des victimes et surtout la dispersion des porteurs mobiles parmi les points de convergence.

Dans les derniers tests, nous avons envisagé deux autres modifications de la mobilité : la présence de véhicules rapides, et un taux plus faible de conscience et d'information de la population. Ces évaluations fournissent des premières réponses, mais mettent aussi en évidence des limitations du modèle de mobilité.

Dans le chapitre suivant, nous explorons plus en profondeur l'impact de la mobilité sur le système, en agissant sur un paramètre fondamental : le ratio des effectifs de porteurs immobiles – notre cible prioritaire –, et de porteurs mobiles – les principaux acteurs de l'acheminement des données.

TABLEAU 5.2 – Véhicules – valeurs en fin de simulation

		Nb de	Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData		
		PC	valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR	
Véhicules	Wi-Fi / SnW	$P_{pre\,Warned} = 0,8$	3	99.8%	1.00	99.3%	1.00	94.9%	0.99	0:55	94.1	0.93	1.97e3	0.95
		5	69.4%	0.99	68.7%	0.99	62.9%	1.00	0:43	68.9	0.95	1.28e3	1.02	
		20	25.5%	1.02	25.0%	1.02	19.8%	0.99	0:50	37.6	0.97	5.80e2	0.99	
	$P_{pre\,Warned} = 0,2$	3	99.5%	1.00	99.1%	1.00	95.1%	1.00	0:53	92.3	0.91	1.98e3	0.96	
		5	68.4%	0.98	67.9%	0.98	63.6%	1.01	0:43	67.3	0.93	1.22e3	0.98	
		20	25.1%	1.00	24.6%	1.00	20.1%	1.01	0:50	36.9	0.95	5.70e2	0.97	
	$P_{pre\,Warned} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10	
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85	
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59	
	$P_{pre\,Warned} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02	
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82	
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60	

Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

RR : « risque relatif » par rapport au scénario de référence

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

Chapitre 6

Proportion de porteurs mobiles / statiques

Supposer immobiles 10 % des porteurs (200 sur 2000), comme nous l'avons fait dans le chapitre précédent, est cohérent dans le cadre d'une catastrophe aux conséquences humaines et matérielles limitées, et si les consignes officielles n'incitent pas les populations touchées à rester immobile (ou si ces consignes sont peu suivies). Il existe ainsi de nombreuses situations où la mobilité serait bien moindre. Par ailleurs, si l'on envisage l'utilisation de matériels fixes dédiés, comme des throwboxes, ceux-ci se comporteraient aussi comme des porteurs immobiles.

Dans ce chapitre, nous étendons notre évaluation pour prendre en compte ces situations. À partir du scénario de référence défini au début du chapitre précédent, nous avons effectué de nouvelles simulations en supposant cette fois 30, 50, 70 ou même 90 % des porteurs statiques. Le nombre de porteurs total, mobiles et statiques, reste fixé à 2000 dans tous les scénarios, de sorte que notre étude se concentre sur l'impact du ratio mobile/statique sur une population de densité constante.

On peut déjà anticiper des conséquences directes importantes de ces changements sur notre scénario. D'abord, avec une plus forte proportion de porteurs immobiles, on réduit d'autant le nombre de porteurs susceptibles d'atteindre un hotspot et d'être ainsi, de fait, localisés.

Avec plus de porteurs statiques, la probabilité de voir apparaître des composantes connexes stables de grande taille augmente. Ces composantes, en permettant une transmission des données rapide (du moins en Epidemic) et à travers des lieux laissés inexplorés par les porteurs mobiles (comme les limites entre cellules de Voronoï) pourraient avoir un impact positif sur les performances globales ou sur le temps de convergence de la collecte.

Nous évaluons à nouveau, pour ces différentes proportions de porteurs mobiles et statiques, l'impact des différents paramètres de mobilité, du nombre de points de convergence, et des choix de matériel et de protocoles sur les performances de collecte. L'éva-

TABLEAU 6.1 – Paramètres de simulation – scénario de référence

Nœuds mobiles/victimes	2000, dont 10 à 90 % mobiles
Vitesse	constante, $1,3 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 4,7 \text{ km/h}$)
Choix PC	Plus proche
Interface	Wi-Fi (100 m) Bluetooth (10 m), continue
Protocole	Epidemic Spray and Wait

luation repose sur les métriques sélectionnées au chapitre précédent. Sont donc représentés, dans chaque cas, pour les performances de collecte, la proportion de porteurs mobiles localisés (graphiques de gauche) et la proportion de porteurs statiques localisés (graphiques de droite), avec des interfaces Wi-Fi et Bluetooth (respectivement dans les graphiques supérieurs et inférieurs). La consommation énergétique est mesurée par le nombre de trames moyen (graphiques de gauche) et le volume de données moyen (graphiques de droite) transmis par porteur, en Wi-Fi et en Bluetooth. Dans chaque graphique, les courbes correspondant à l'emploi d'un routage Epidemic ou Spray and Wait, en présence de 3, 5 ou 20 points de convergence, sont tracées. Sur ces points de convergence, seuls 3, dans tous les cas, sont des hotspots.

Cependant, par souci de lisibilité des graphiques, les résultats seront présentés différemment. L'évolution des différentes mesures au cours du temps de simulation ne sera plus tracée : seules les valeurs finales seront représentées en fonction de la proportion de porteurs mobiles. On retrouvera ainsi à l'extrémité droite des graphiques (90 % de porteurs mobiles) les valeurs correspondant aux résultats du chapitre précédent.

6.1 Interfaces et protocoles

6.1.1 Scénario de référence

Nous repartons pour ce chapitre du scénario de référence, dont les paramètres sont rappelés dans le tableau 6.1. Seules sont modifiées les proportions de porteurs mobiles et immobiles, maintenant variables.

La figure 6.1 présente les résultats obtenus. Les valeurs exactes pour les simulations à 10 %, 50 % et 90 % de porteurs mobiles sont aussi reportées dans le tableau 6.2. Le reste des valeurs est joint en annexe A. Comme le montrent les figures fig. 6.1a et c, dont toutes les courbes sont quasi-constantes, le ratio mobiles/statiques n'a aucun impact significatif sur la proportion de porteurs mobiles localisés.

Pour les porteurs immobiles par contre (fig. 6.1b et d), on observe clairement une corrélation : plus ils sont nombreux – moins il y a de porteurs mobiles –, moins ils ont de chance d'être localisés, avec des chutes de performances particulièrement importantes à 30 et 10 % de porteurs mobiles. Si des composantes connexes de porteurs statiques étaient bien présentes, elles ne suffisent donc pas à compenser le manque de mobilité dans les simulations à faible ratio mobiles/statiques.

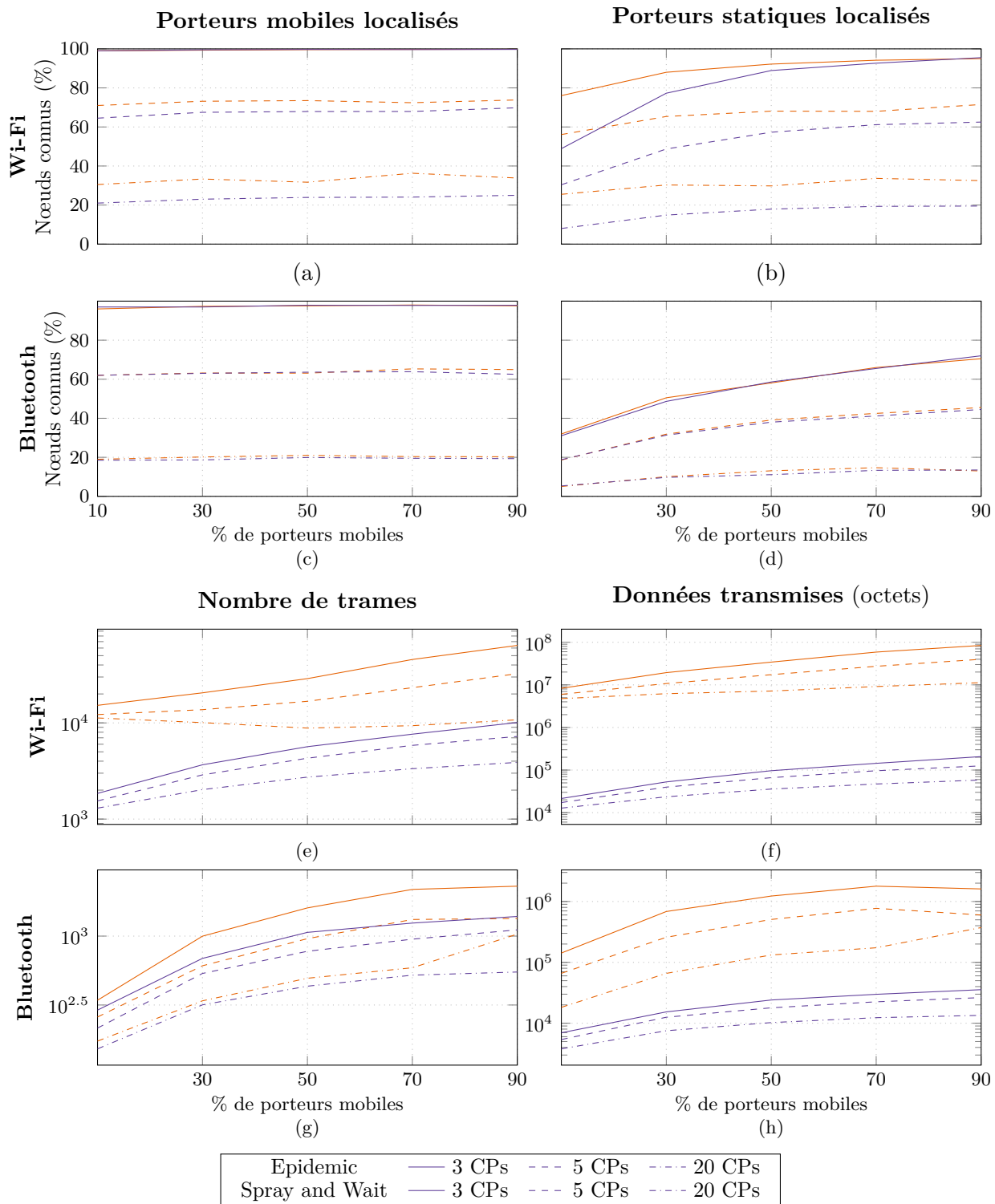


FIGURE 6.1 – Scénario de référence

TABLEAU 6.2 – Ratio mobile / statique – Scénario de référence
Extraits des résultats

		Nb PC	Mobiles	Tous	Victimes	Stab.	nMesg	sData	
90% mobiles	Wi-Fi	Epidemic	3	99.8%	99.3%	95.4%	0:46	638.9	8.43e5
			5	73.9%	73.7%	71.9%	0:30	324.9	3.99e5
			20	33.8%	33.8%	32.9%	0:50	107.7	1.13e5
		SnW	3	99.7%	99.3%	95.6%	0:55	100.9	2.07e3
			5	69.8%	69.1%	62.9%	0:45	72.3	1.25e3
			20	25.0%	24.5%	19.9%	0:50	38.9	5.85e2
	Bluetooth	Epidemic	3	97.6%	94.9%	70.6%	0:58	23.0	1.61e4
			5	65.0%	63.1%	45.9%	0:46	13.4	6.00e3
			20	20.3%	19.6%	13.4%	0:51	10.3	3.73e3
		SnW	3	97.9%	95.3%	72.3%	0:58	13.9	3.56e2
			5	62.5%	60.7%	44.6%	0:46	11.1	2.63e2
			20	19.3%	18.8%	13.6%	0:51	5.5	1.35e2
50% mobiles	Wi-Fi	Epidemic	3	99.7%	95.9%	92.2%	0:48	288.6	3.42e5
			5	73.6%	70.9%	68.1%	0:33	167.7	1.74e5
			20	31.8%	30.8%	29.9%	0:50	88.3	7.17e4
		SnW	3	99.7%	94.3%	89.0%	0:56	56.6	9.66e2
			5	67.9%	62.6%	57.3%	0:45	43.0	6.63e2
			20	24.0%	21.0%	18.0%	0:50	27.3	3.58e2
	Bluetooth	Epidemic	3	97.6%	77.9%	58.2%	0:58	16.0	1.23e4
			5	63.2%	51.2%	39.2%	0:45	9.6	5.07e3
			20	21.0%	17.1%	13.2%	0:51	4.9	1.32e3
		SnW	3	97.9%	78.3%	58.6%	0:58	10.6	2.41e2
			5	63.6%	50.8%	38.1%	0:46	7.8	1.79e2
			20	19.9%	15.6%	11.2%	0:51	4.3	1.02e2
10% mobiles	Wi-Fi	Epidemic	3	99.2%	78.4%	76.1%	0:55	152.2	8.31e4
			5	71.2%	57.6%	56.1%	0:41	122.1	6.01e4
			20	30.5%	26.0%	25.5%	0:51	112.6	4.76e4
		SnW	3	99.1%	53.9%	48.9%	0:58	18.5	2.15e2
			5	64.9%	33.9%	30.4%	0:41	15.4	1.73e2
			20	21.3%	9.3%	8.0%	0:50	13.0	1.28e2
	Bluetooth	Epidemic	3	96.3%	38.4%	32.0%	0:58	3.4	1.42e3
			5	62.0%	23.0%	18.7%	0:51	2.6	6.60e2
			20	19.1%	6.5%	5.1%	0:51	1.7	1.82e2
		SnW	3	97.2%	37.7%	31.1%	0:58	2.9	6.96e1
			5	62.3%	23.1%	18.8%	0:50	2.2	5.39e1
			20	18.6%	6.7%	5.4%	0:51	1.5	3.79e1

Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

Dans le cas le plus favorable (Wi-Fi/Epidemic avec 3 PC, fig. 6.1b), on passe ainsi de 95 % de porteurs statiques localisés avec 90 % de porteurs mobiles à seulement 76 % quand on descend à 10 % de porteurs mobiles. Avec Spray and Wait la chute de performance est plus brutale encore, de 95 % à 49 % : les messages en phase *wait* ne pouvant plus être transmis, ceux-ci n'ont aucune chance de parvenir à destination si leur porteur est statique.

En augmentant le nombre de porteurs statiques, on favorise donc ces « pertes » de messages, bloqués indéfiniment. On notera que ces porteurs statiques rassemblés en composantes connexes, qui handicapent l'acheminement des messages aux hotspots en Spray and Wait, n'en réduisent pas si fortement pour autant la consommation : les différentes copies d'un message peuvent être disséminées parmi les nœuds de la composante – ce qui implique potentiellement autant de transmissions qu'avec des porteurs mobiles. Seule la délivrance finale du message au hotspot n'arrive jamais.

Ces observations sont cohérentes avec les mesures de nombre de trames et données transmises (fig. 6.1e-f), qui baissent à mesure qu'on réduit le nombre de porteurs mobiles avec Epidemic, et plus encore avec Spray and Wait.

En Bluetooth (fig. 6.1d), comme dans le chapitre précédent, le choix du protocole de routage n'a pas d'impact significatif sur les performances de collecte : on passe donc dans les deux cas de $\sim 70\%$ à $\sim 32\%$ de porteurs localisés, en abaissant à 10 % la proportion de porteurs mobiles.

La transmission des messages est donc dans tous les cas limitée par la portée de signal de Bluetooth plus que par le protocole. Ceci explique aussi l'écart relativement faible entre Epidemic et Spray and Wait en nombre de messages transmis (fig. 6.1g), même si Epidemic produit toujours des trames plus remplies (6.1h) : les contacts ne sont pas assez fréquents pour que la majorité des porteurs diffusent toutes leurs copies en Spray and Wait, de sorte qu'ils ont presque toujours au moins un message à transmettre. Le nombre de trames émises est alors proche du nombre de trames émises par Epidemic. Cet effet s'accroît lorsque le nombre de porteurs mobiles diminue : les contacts deviennent encore moins fréquents, entraînant une chute du nombre de trames transmises.

Ces résultats montrent un impact direct de la proportion de porteurs mobiles / statiques sur les capacités de notre architecture, en particulier sur la localisation des porteurs statiques, notre cible prioritaire. Dans les sections suivantes, nous évaluons l'impact des paramètres de mobilité et de communications définis précédemment. On peut raisonnablement supposer que les effets seront similaires aux résultats déjà présentés au chapitre précédent. Ces nouvelles expérimentations permettront de le confirmer, mais aussi de déceler d'éventuels effets combinés : l'utilisation d'interfaces intermittentes a-t-elle toujours, d'un point de vue quantitatif, le même impact lorsque la majorité des porteurs est statique ? Le choix aléatoire du point de convergence permet-il *toujours* de compenser la dispersion des porteurs due à la présence de PC non communicants ?

Pour pouvoir comparer les résultats obtenus par rapport à une référence commune, sans pour autant alourdir les graphiques, tous les résultats des sections suivantes sont

normalisés par rapport aux résultats du scénario de référence correspondant (même interface, protocole, nombre de PC) présentés en figure 6.1. Les valeurs ainsi obtenues peuvent être interprétées comme le « risque relatif » d’être localisé dans le cas étudié par rapport au scénario de référence.

Ce choix de représentation a cependant un effet secondaire : dans les cas où les performances du scénario de référence sont mauvaises (Bluetooth / Spray and Wait avec 20 PC, par exemple) la normalisation par ces faibles valeurs rend la mesure très sensible, donnant ainsi une importance disproportionnée à des variations pourtant peu significatives dans l’absolu.

Les valeurs originales sont représentées en annexe A pour référence.

6.1.2 Interfaces intermittentes

Les résultats avec interfaces intermittentes sont présentés par la figure 6.2. Pour les porteurs mobiles, l’impact sur la localisation est négligeable, avec une légère tendance négative, notamment en Bluetooth (fig. 6.2c). Les seules courbes qui semblent s’éloigner de la référence correspondent aux scénarios à 20 PC, dont les résultats de référence sont faibles. L’analyse des valeurs brutes (en annexe) confirme que ces variations sont en réalité minimales dans l’absolu.

Pour les porteurs immobiles, les résultats sont plus variables : si les performances semblent peu affectées par l’intermittence dans tous les cas avec un routage Epidemic sur interface Wi-Fi (fig. 6.2b), le routage Spray and Wait voit ses performances chuter lorsque l’on immobilise des porteurs, avec jusqu’à $\sim 30\%$ de pertes par rapport à la référence avec 10 % de porteurs mobiles. Cet écart est visible même avec 20 PC ; un cas qui semblait insensible à l’intermittence – parce que déjà fortement handicapé par la dispersion – avec 90 % de porteurs mobiles. On peut certainement attribuer cet écart à la présence, à faible ratio mobile/statique, de nombreux porteurs ou groupes de porteurs statiques relativement isolés : les porteurs mobiles passant brièvement à proximité peuvent collecter leurs données, sauf si les interfaces, intermittentes, sont désactivées à ce moment.

Avec des interfaces Bluetooth, on obtenait déjà, avec 90 % de porteurs mobiles, une perte de l’ordre de 30 % des porteurs immobiles par rapport à la référence en utilisant des interfaces intermittentes, quel que soit le protocole et le nombre de PC. L’effondrement des performances s’aggrave encore avec l’augmentation du nombre de porteurs immobiles, jusqu’à $\sim 45\%$ de pertes pour 10 % de porteurs mobiles (fig. 6.2d).

Sur toutes ces simulations, sauf Wi-Fi/Epidemic qui est très peu affecté, la perte relative de performances de localisation induite par l’intermittence est d’autant plus forte que les PC sont nombreux : l’intermittence nuit aux échanges de données inter-cellules, cruciales dès lors qu’il existe des PC non communicants. Il y a pourtant des exceptions : avec un routage Spray and Wait, en Bluetooth et dans une moindre mesure en Wi-Fi, sur une répartition 90 % mobiles / 10 % statiques – le cas présenté au chapitre précédent –, la perte en nombre de porteurs statiques localisés est relativement moins importante lorsque l’on ajoute des PC.

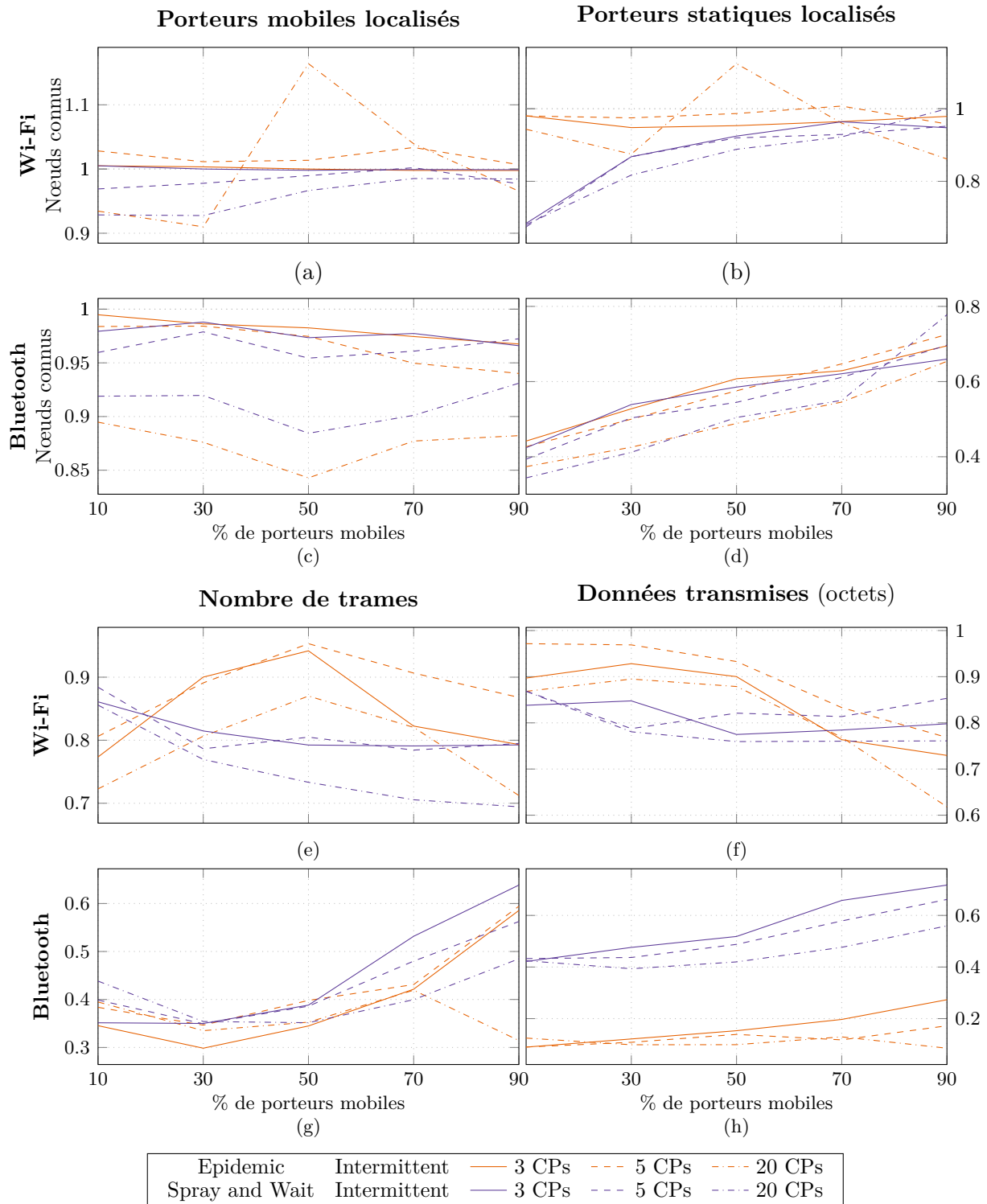


FIGURE 6.2 – Interface intermittente

Il semble donc y avoir un effet combiné complexe de l'intermittence, des proportions de porteurs mobiles et statiques, et de la dispersion des porteurs parmi les points de convergence, qui tend à accentuer la dégradation induite par la dispersion des porteurs mobiles lorsque les interfaces sont intermittentes et les porteurs immobiles sont relativement nombreux.

Comme observé au chapitre précédent avec 90 % de porteurs mobiles, l'intermittence permet bien de réduire la consommation, tant en nombre qu'en volume des messages échangés. Cette baisse est relativement modeste avec des interfaces Wi-Fi (fig. 6.2e-f). En Bluetooth, l'intermittence permet une baisse de 40 à 70 % du nombre de trames échangées (fig. 6.2g), et de 55 à 90 % (avec un routage Epidemic) du volume de données (fig. 6.2h). Ce gain est particulièrement important dans les situations à faible proportion de porteurs mobiles.

En terme d'économie d'énergie, l'intermittence a donc, sur des interfaces Bluetooth, un effet comparable au choix de Spray and Wait plutôt qu'Epidemic – avec cependant un impact sur les performances beaucoup plus néfaste.

Ces résultats confirment que l'intermittence a un intérêt très limité sur des interfaces Bluetooth, déjà très économes et sur lesquelles la perte en performances serait particulièrement importante. En Wi-Fi, l'intermittence peut permettre de réduire la consommation sans trop de pertes, autant avec Epidemic que Spray and Wait, tant que les porteurs immobiles sont peu nombreux. Dans le cas contraire, l'intermittence reste utilisable avec un routage Epidemic, mais réduit de manière significative les performances de géolocalisation des porteurs immobiles avec Spray and Wait.

6.2 Mobilité

6.2.1 Vitesse de marche

La figure 6.3 présente les résultats obtenus en donnant une vitesse variable aux porteurs mobiles. Comme précédemment, chaque déplacement se fait ici à une vitesse tirée aléatoirement entre $0,7 \text{ m s}^{-1}$ à $2,0 \text{ m s}^{-1}$ ($2,5 \sim 7,2 \text{ km/h}$), contre une vitesse constante de $1,3 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 4,7 \text{ km/h}$) dans le scénario de référence. Avec 90 % de porteurs mobiles, les simulations avec 3 PC, des interfaces Wi-Fi, un routage Epidemic, et une vitesse de déplacement variable n'avaient pas pu aboutir (cf. section 5.2.1). Pour les ratios mobiles / statiques plus faibles, les simulations ont réussi ; il ne manque donc aucune autre valeur ici.

Cette fois encore, et quelle que soit la proportion de porteurs mobiles, la variabilité de la vitesse de marche des porteurs mobiles n'a qu'un très faible impact sur les performances de collecte, inférieur à 5 % des valeurs du scénario de référence (fig. 6.3a-d). Seules les simulations exécutées avec 20 PC semblent affectées. Ces variations ne sont en fait pas plus significatives, mais amplifiées par la normalisation : elles ne représentent au maximum que 10 % de valeurs de référence très faibles.

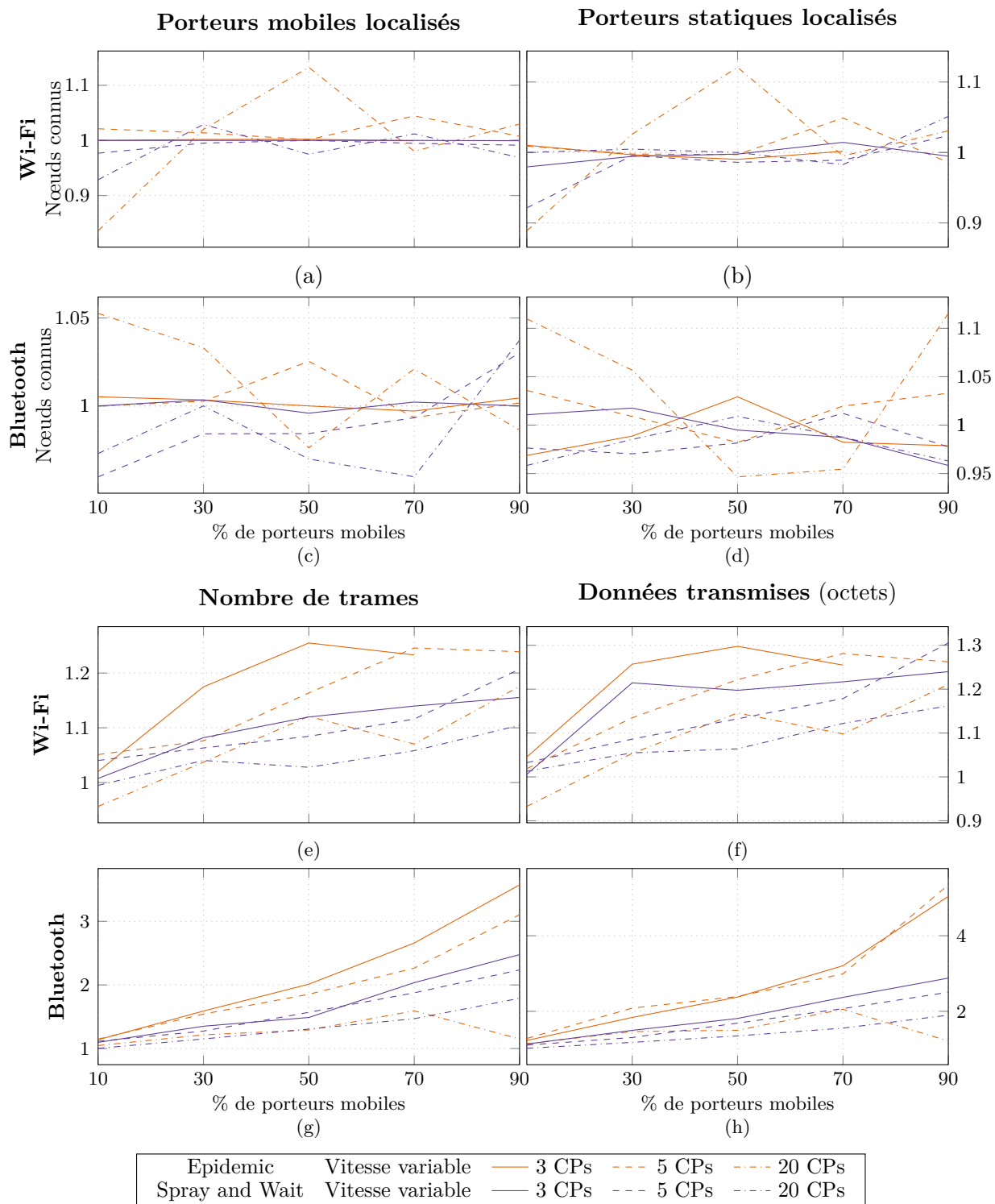


FIGURE 6.3 – Vitesse de marche variable

On retrouve bien par contre l'impact des vitesses variables sur le nombre et le volume des trames échangées : une augmentation allant jusqu'à $\sim 30\%$ en Wi-Fi (fig. 6.3e), et d'un facteur 3–4 en Bluetooth (fig. 6.3f). Ici aussi, on observe un effet combiné de la vitesse de marche avec le nombre de points de convergence et le nombre de porteurs mobiles : plus ceux-ci sont nombreux et moins ils sont dispersés entre des PC non communicants, c.-à-d. plus leur densité est localement élevée, plus l'augmentation est forte.

Ces résultats confortent notre première interprétation : les variations de vitesse n'ont qu'un faible impact sur la structure globale du réseau, mais provoquent des connexions et déconnexions plus fréquentes à petite échelle, déclenchant des échanges supplémentaires. Il est alors tout naturel que ces effets se manifestent plus particulièrement lorsque les porteurs concernés – les mobiles – sont plus nombreux, et surtout quand ils se concentrent sur les mêmes zones, autour des points de convergence.

6.2.2 Choix du point de convergence

La figure 6.4 présente les résultats obtenus avec 50 % des porteurs mobiles choisissant aléatoirement leur destination parmi les points de convergence. Du fait des limitations du simulateur, les simulations pour 70 % et 90 % de porteurs mobiles, avec un routage Epidemic sur interface Wi-Fi n'ont pas pu aboutir. Ces configurations étaient, dans le scénario de référence où le choix de destination est déterministe, parmi les plus favorables en terme de performances de collecte ; on ne pouvait donc pas espérer d'améliorations significatives sous cet aspect. Concernant la consommation énergétique, on peut supposer qu'une extrapolation des résultats des autres scénarios fournira une estimation assez fidèle des résultats manquants.

L'effet du choix aléatoire est globalement comparable à ce que nous avons pu observer au chapitre précédent, et dépend principalement du nombre de points de convergence.

Avec seulement les 3 hotspots, l'effet sur les performances semble faible voire inexistant. Pour les porteurs mobiles (fig. 6.4a et c), qui bénéficient déjà de performances excellentes dans le scénario de référence, on pouvait de toute façon difficilement espérer mieux. Pour les porteurs immobiles (fig. 6.4b et d), la marge d'amélioration est nettement plus importante, en particulier lorsqu'ils sont nombreux. Dans ces cas-là, on peut justement observer une légère amélioration dans leur localisation. Puisque dans ces scénarios tous les points de convergence sont des hotspots, cette amélioration ne peut s'expliquer que par la couverture accrue de la zone par les porteurs mobiles : en s'écartant des chemins convergents vers le PC le plus proche, ils augmentent les chances de passer à portée de porteurs statiques non localisés. Cet effet s'amplifie à mesure que la densité des porteurs immobiles augmente, bien que contrebalancée par la diminution consécutive du nombre de porteurs mobiles disponibles pour couvrir la zone.

Avec 5 points de convergence, on retrouve les améliorations spectaculaires qui permettent presque de compenser la dispersion due aux PC non communicants, pour tous les porteurs. Pour les porteurs mobiles, le gain est indépendant du ratio mobiles/immobiles et du protocole de routage. Pour les immobiles par contre, les performances

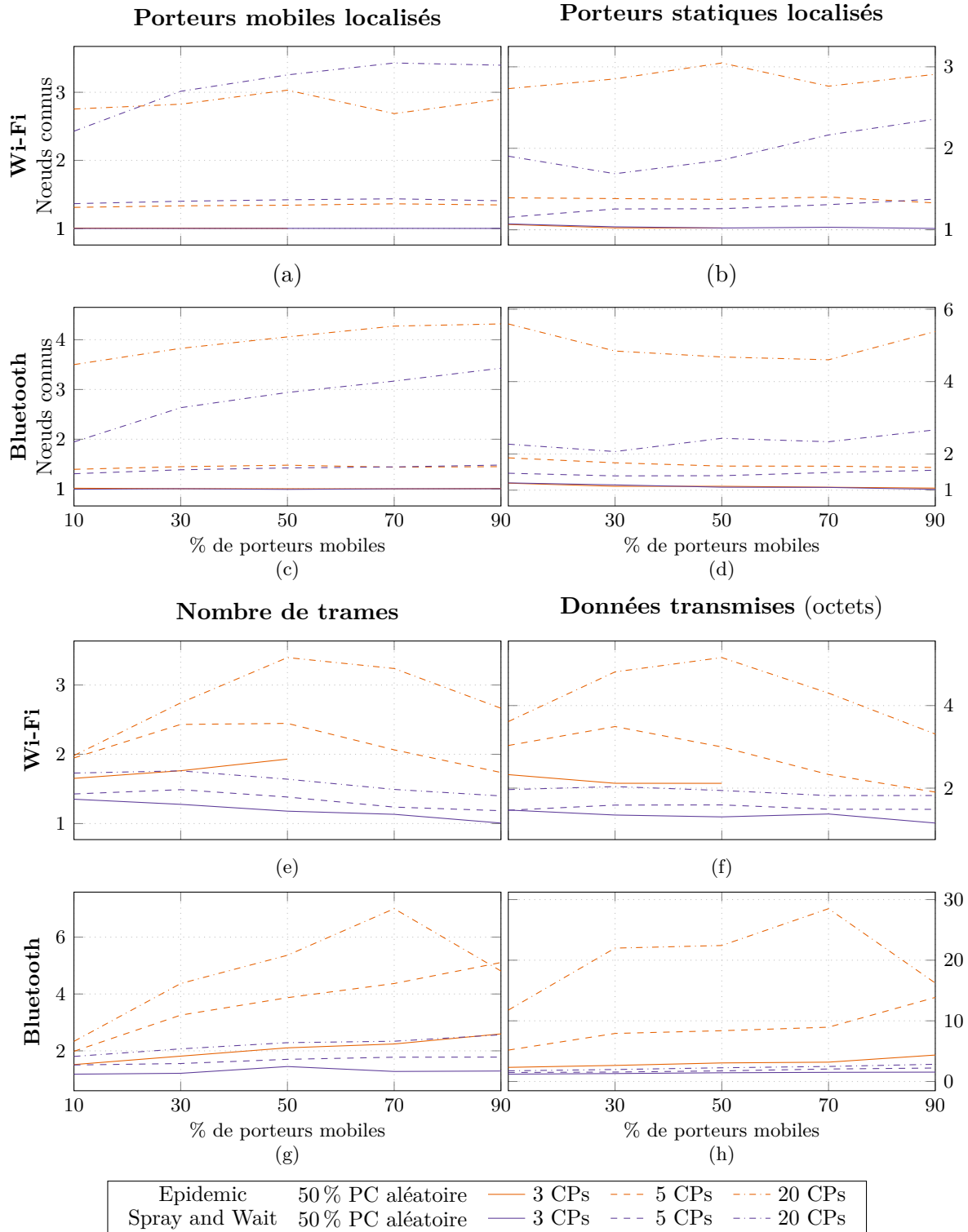


FIGURE 6.4 – Nearest vs. Random CP (RR)

semblent limitées par Spray and Wait par rapport à Epidemic, en particulier lorsqu'ils sont nombreux : avec la formations de composantes connexes statiques (et isolées) statistiquement de plus en plus grandes, les copies des messages peuvent être entièrement disséminées parmi des porteurs immobiles, ne laissant plus aucune copie disponible pour les porteurs mobiles qui passeraient à portée. À l'inverse, avec des interfaces Bluetooth (fig. 6.4d), la présence de porteurs divergents semble d'autant plus profiter aux porteurs immobiles que ces derniers sont nombreux : l'augmentation de la couverture de la zone par les porteurs mobiles compense partiellement l'isolement des nombreuses composantes connexes de porteurs immobiles qui apparaissent dans ces scénarios, et dont la faible portée des interfaces Bluetooth limite la collecte des données.

Avec 20 points de convergence aussi, on retrouve les améliorations considérables du chapitre 5 – jusqu'à un facteur 5 sur le nombre de porteurs statiques localisés, en Bluetooth/Epidemic. Les courbes sont plus « perturbées » du fait des performances relativement faibles du système dans le scénario de référence, mais on distingue tout de même une tendance assez nette pour les porteurs mobiles, qui profitent d'autant mieux du choix aléatoire qu'ils sont nombreux – et donc que les porteurs divergents, seuls capables de compenser efficacement la passivité des PC non communicants, sont nombreux. On remarquera que, si le gain pour les porteurs mobiles est indépendant de l'interface et du protocole de routage avec 3 et 5 point de convergence, la combinaison Bluetooth/Epidemic semble ici se démarquer : lorsque le protocole de routage le permet, le choix de PC aléatoire contribue aussi à compenser la faible portée du Bluetooth. Pour les porteurs statiques, la tendance est moins claire mais semble globalement similaire.

Cette amélioration des performances de localisation s'accompagne d'une augmentation de la consommation du même ordre, surtout avec Epidemic. En particulier, avec un routage Epidemic sur interface Bluetooth, l'augmentation du nombre de trames transmises (fig. 6.4e) et du nombre de porteurs localisés sont du même ordre, mais le volume de données transmises (fig. 6.4h) augmente d'un ordre de grandeur supplémentaire : en plus d'augmenter la fréquence des contacts, la mobilité des porteurs divergents permet de mieux exploiter la capacité des transmissions en produisant des trames plus « remplies » ; un effet qui n'apparaît pas en Spray and Wait, ce qui conforte l'hypothèse d'une sous-exploitation de la capacité du système par le protocole.

En Bluetooth, cette augmentation de consommation est généralement d'autant plus importante que les porteurs mobiles sont nombreux – une variation cohérente avec l'amélioration des performances de localisation –, et ce alors même que le scénario de référence présentait déjà une forte augmentation de la consommation avec le nombre de porteurs mobiles. En Wi-Fi (fig. 6.4e-f) au contraire, l'augmentation de consommation est plus modérée sur les taux de mobilité élevés (avec Epidemic), voire globalement décroissant avec le ration mobiles/immobiles (Spray and Wait) : les porteurs divergents favorisent peut-être surtout les échanges entre porteurs mobiles et immobiles.

L'impact positif observé au chapitre précédent des porteurs divergents sur la localisation, en particulier des porteurs statiques, en présence de points de convergence non

communicants, se généralise donc bien quel que soit le nombre de porteurs mobiles et statiques. Cette amélioration, plus ou moins importante selon le nombre de porteurs mobiles et de points de convergence, le protocole de routage et dans une moindre mesure la portée de signal, est due principalement à un accroissement des échanges entre les cellules de Voronoi et à une augmentation de la couverture de la zone par les porteurs divergents, permettant une meilleure collecte des données des porteurs statiques isolés,

Cette amélioration fulgurante s'accompagne d'une augmentation de la consommation relativement raisonnable quoique non négligeable.

6.2.3 Véhicules et alerte

Nous avons aussi testé l'ajout de véhicules et la diminution du nombre $P_{preWarned}$ de personnes alertées en début de simulation, en variant le ratio de porteurs mobiles/statiques. Comme au chapitre 5, ces dernières évaluations sont restreintes aux combinaisons Wi-Fi/Spray and Wait et Bluetooth/Epidemic.

La figure 6.5 présente les résultats obtenus en remplaçant 10 % des porteurs mobiles par des véhicules se déplaçant à une vitesse de 30 km h^{-1} ($8,3 \text{ m s}^{-1}$). Ces résultats sont comparables à ceux que nous avons déjà analysés : un impact sur les performances finale négligeable dans la plupart des cas, avec une variabilité trop forte pour déceler une tendance significative. L'impact est même globalement encore plus faible lorsque le nombre de porteurs mobiles est réduit. Seule la consommation en Bluetooth (fig. 6.5g-h) augmente réellement, surtout lorsque les porteurs mobiles sont nombreux.

La diminution de $P_{preWarned}$ (fig. 6.6) ne semble pas non plus avoir d'impact significatif sur les performances de collecte, ni sur la consommation énergétique avec les communications Wi-Fi/Spray and Wait. Avec Bluetooth/Epidemic, on peut observer une légère baisse des performances de collecte (fig. 6.6c-d), surtout avec 20 points de convergence. Cette variation reste très modeste : avec la densité de porteurs et le mode de diffusion de l'alerte choisis, l'information est rapidement transmise parmi les porteurs. Suffisamment rapidement pour que leur mobilité soit peu affectée, et qu'ils transmettent aussi rapidement leur position.

6.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé notre architecture de localisation sur différents ratios porteurs mobiles / victimes, et ré-évalué l'impact des différents paramètres de mobilité et de communication dans ces conditions. Certains résultats du chapitre 5 se généralisent à tous les scénarios, comme l'impact négatif de la dispersion des porteurs parmi les points de convergence inactifs, ou le fait que Spray and Wait est moins limitant sur les transmissions que la faible portée des interfaces Bluetooth, sur lesquelles les deux protocoles Epidemic et Spray and Wait permettent ainsi des performances de localisation très similaires.

Ces résultats confirment aussi la plus grande sensibilité de la localisation des victimes aux différentes variations par rapport aux porteurs mobiles. Ceux-ci ont sensiblement les

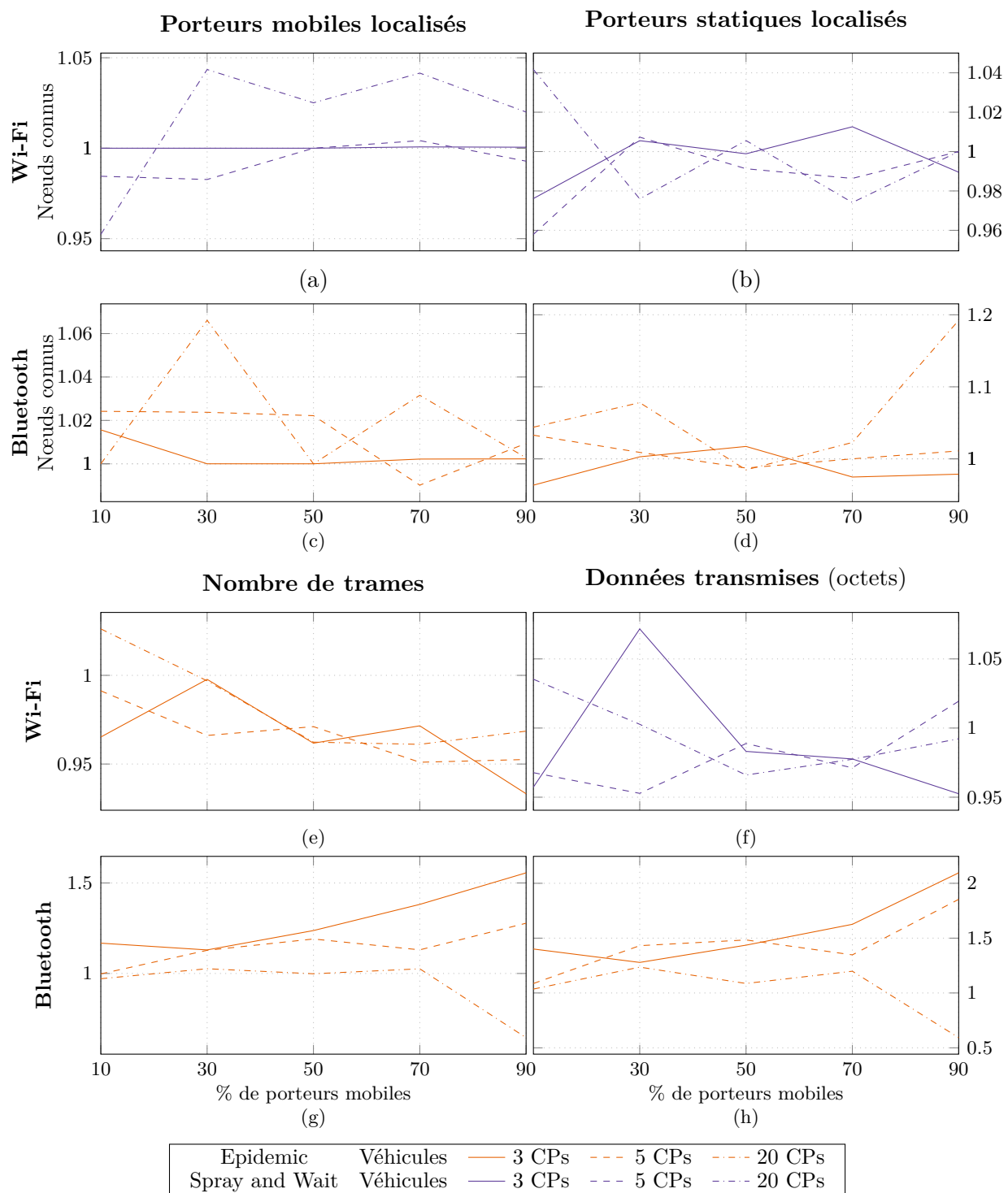


FIGURE 6.5 – Véhicules

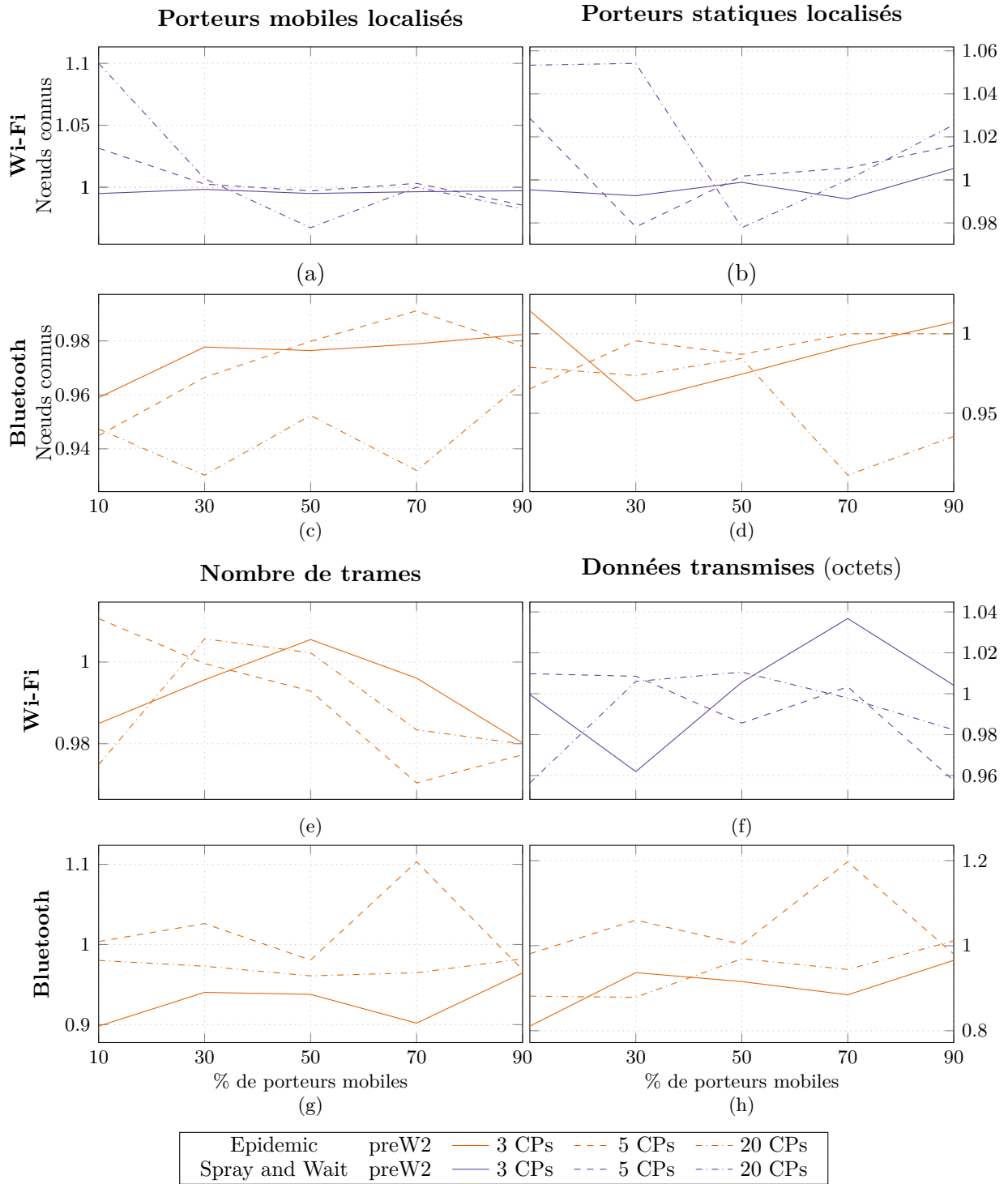


FIGURE 6.6 – $P_{preWarned}=.2$

mêmes chances d'être localisés quel que soit leur nombre, avec des interfaces continues ou intermittentes, etc.. Au contraire, les porteurs statiques, qui dépendent entièrement des porteurs mobiles, ont d'autant plus de chances d'être localisés que les porteurs mobiles sont nombreux. Cette baisse de performances est encore accentuée par l'utilisation d'interfaces intermittentes, et s'accompagnent de baisses de consommation. L'augmentation du nombre de victimes entraîne cependant la formation de groupes statiques ; des composantes connexes fixes du réseau, qui peuvent accélérer la transmission des données dans certaines conditions mais contribuent aussi à alourdir la consommation énergétique.

On retrouve aussi, quel que soit le nombre de porteurs mobiles et statiques, les effets de la vitesse de déplacement, faibles sur les performances mais relativement important sur la consommation énergétique. On observe en particulier un effet combiné de la variabilité de la vitesse avec le nombre de porteurs mobiles et le nombre de PC, qui augmentent localement la densité des porteurs mobiles, favorisant encore l'envoi de trames.

L'ajout de porteurs divergents, qui donnait déjà de très bons résultats au chapitre 5, avec 90 % de porteurs mobiles, se montre aussi bénéfique pour les performances de localisation quel que soit leur nombre. En permettant une meilleure couverture de la zone et des communications qui traversent les frontières des cellules de Voronoi, les porteurs divergents ont un impact important dès lors que des PC inactifs sont présents.

Les derniers tests, sur les véhicules et l'état de conscience initiale des porteurs, confirment bien les premiers résultats du chapitre précédent mais se heurtent tous aux limitations du modèle de mobilité.

Chapitre 7

Conclusion

7.1 Synthèse

Dans le cadre de cette thèse, nous avons proposé une architecture de collecte d'informations pour la géolocalisation des personnes et la cartographie des zones à risques dans un contexte après-crise. Contrairement aux travaux comparables de la littérature, notre système n'est pas spécifique à la localisation des secouristes, mais concerne l'ensemble des personnes présentes dans les premiers instants, suivant une mobilité spécifique.

Afin d'évaluer par simulation notre système, suivant un scénario spécifique, nous avons proposé un nouveau modèle de mobilité, qui représente les déplacements de personnes se trouvant dans la zone sinistrée. Selon leur état, leur conscience de la situation et du comportement à adopter, et l'état du terrain, elles se déplacent ainsi suivant une mobilité principalement convergente, collectant au passage les données de localisation des autres personnes, en particulier des victimes immobilisées.

Pour acheminer ces informations vers les centres de collecte, par des échanges pair-à-pair, nous avons choisi les deux protocoles de routage DTN Epidemic et Spray and Wait. Nous les avons adaptés pour gérer l'obsolescence des données, et pour limiter la fréquence des retransmissions de messages analogues.

Nous avons implémenté le modèle de mobilité et l'ensemble de l'architecture sur le simulateur ONE, afin d'en mesurer les performances. Nous avons proposé des métriques d'évaluation suivant deux axes : les performances de collecte, et l'économie d'énergie. Parmi ces métriques, nous en avons retenu quatre, pour leur pertinence et leur simplicité d'analyse : les proportions de porteurs mobiles et de victimes localisés, et les nombre et volumes moyens de trames transmises par porteur.

Après une première évaluation du système dans un scénario de référence, nous avons mesuré l'impact de différents paramètres de communications et de mobilité : choix de l'interface, choix du protocole de routage, utilisation d'interfaces intermittentes, présence de points de convergence passifs, vitesse de déplacement des porteurs, présence de porteurs présentant une mobilité différente, et enfin présence de véhicules rapides et conscience de la situation en début de scénario.

Nous observons ainsi que si les interfaces Wi-Fi et le protocole Epidemic donnent de meilleures performances que, respectivement, Bluetooth et Spray and Wait, au prix d'une consommation d'énergie accrue, l'utilisation de Spray and Wait sur des interfaces Wi-Fi est un compromis intéressant dans la plupart des situations. Un fonctionnement intermittent des interfaces peut aussi réduire la consommation, mais la baisse de performances induite en réduit considérablement l'intérêt sur des interfaces Bluetooth. Les tests sur la variabilité des vitesses de marche ont montré que son impact sur les performances de collecte est faible, malgré une augmentation de la consommation. L'introduction de porteurs *divergents*, choisissant leur destination aléatoirement parmi les points de convergence, s'est montrée extrêmement efficace pour compenser la présence de points de convergence inactifs.

Avec les véhicules, on observe bien une accélération de la collecte dans les premières minutes, jusqu'à ce que tous les véhicules aient atteint leur destination et soient ainsi désactivés. Ainsi, si les secouristes arrivent rapidement sur les lieux, les véhicules pourraient leur permettre d'obtenir très rapidement la majorité des informations ; et ce même si les performances finales restent globalement inchangées, avec de dernières informations qui arrivent plus tard.

Nous avons enfin élargi cette évaluation à des situations différentes, où les victimes, ou plus généralement les personnes demeurant immobiles, peuvent être plus nombreuses, voire majoritaires. Ces résultats supplémentaires confirment les observations déjà formulées, et montrent notamment dans tous les cas un plus grand impact des paramètres sur la localisation des victimes que des porteurs mobiles. Nous montrons aussi que lorsque les porteurs statiques sont nombreux, la formation de groupes immobiles, qui pourraient se comporter comme des réseaux de relais et permettre des transmissions rapides, ne suffit pas à compenser le manque de mobilité. Nous avons enfin observé les effets des différents paramètres testés comparables à ceux observés en première étude, encore accentués par la faible mobilité.

Parallèlement à ces travaux, nous avons validé la faisabilité de notre solution en construisant un prototype de plateforme de test matérielle de réseau mobile.

Enfin, nous avons commencé à développer des outils d'analyse du réseau à l'aide de graphes dynamiques, qui pourraient fournir aux terminaux des informations en temps réel pour anticiper les déplacements, reconnaître des comportements, et optimiser le routage.

7.2 Perspectives

La communication en situation de crise est un domaine de recherche complexe par nature, où beaucoup reste à faire. La singularité et l'imprévisibilité de chaque situation et le contexte de stress extrême qui en découle, les difficultés à collecter et obtenir des données détaillées sur leur déroulement, sont autant d'entraves à la recherche.

Une des priorités devrait donc être la collecte de données réelles avec la mise en place de systèmes permettant, dans le respect de la vie privée, de constituer des bases de données de géolocalisation des personnes sur la durée de la catastrophe et de la gestion de crise. Ces données permettraient d'abord de simuler directement la situation pour tester des systèmes en situation quasi-réelle. Mais les catastrophes, donc les traces elles-mêmes, sont rares et ne permettraient donc pas d'évaluer la sensibilité d'un système aux faibles variations de mobilité. Elles seraient de plus inutilisables pour certains systèmes – typiquement si celui-ci a une influence sur la mobilité, par exemple en fournissant des informations en temps réel aux personnes. Le recours aux modèles de mobilité sera donc toujours nécessaire. Avec notre modèle *Danger Movement*, nous avons déjà testé de nombreuses variations de mobilité. Des données réelles pourraient permettre d'associer à chaque type de crise les paramètres correspondants, ainsi que d'affiner le modèle.

Il serait alors aussi possible de développer d'autres applications, pour répondre aux différents besoins des secouristes, rescapés et victimes sur une période plus longue.

Notre prototype de plateforme matérielle nous a bien permis de valider la faisabilité de notre solution. Cependant, une implémentation réelle, efficace et sans manipulations complexes de la part de l'utilisateur reste difficile à réaliser. Un travail de veille et de recherche serait donc nécessaire pour, d'une part, suivre les évolutions des protocoles et évaluer la faisabilité de l'implémentation de réelles communications décentralisées sur des terminaux grand-public, sans manipulations complexes ; d'autre part, le développement de nouveaux protocoles permettant ces usages, tout en répondant raisonnablement aux préoccupations habituelles de performances et de sécurité.

Indépendamment de ces considérations de faisabilité, cette plateforme pourrait déjà être agrandie et utilisée pour tester des protocoles réseau et algorithmes répartis.

Enfin, un important travail reste à réaliser pour identifier précisément les cas d'utilisation des outils d'analyse de graphes dynamiques existants – y compris l'ego-betweenness centrality sur flot de liens –, en développer de nouveaux si nécessaire, et intégrer les plus pertinents à notre solution de communication.

Annexe A

Résultats complets

Dans ce chapitre sont présentés l'ensemble des résultats discutés dans les chapitres 3, 5 et 6.

Le tableau A.1 rassemble les différentes mesures en fin de simulation pour les scénarios du chapitre 5 : 90 % de porteurs mobiles, 10 % immobiles.

Les figures A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 et A.6 présentent l'ensemble des résultats *non normalisés* – contrairement aux graphiques du chapitre 6, normalisés par les résultats du scénario de référence. Les tableaux A.2, A.3, A.4, A.5 et A.6 reprennent les valeurs correspondantes.

TABLEAU A.1 – Résultats complets du chapitre 5 (90 % de porteurs mobiles)
valeurs en fin de simulation

		Nb de PC	Wi-Fi										
			Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData	
			valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR
Référence	Epidemic	3	99.8%	*	99.3%	*	95.4%	*	0:46	638.9	*	8.43e5	*
		5	73.9%	*	73.7%	*	71.9%	*	0:30	324.9	*	3.99e5	*
		20	33.8%	*	33.8%	*	32.9%	*	0:50	107.7	*	1.13e5	*
	SnW	3	99.7%	*	99.3%	*	95.6%	*	0:55	100.9	*	2.07e3	*
		5	69.8%	*	69.1%	*	62.9%	*	0:45	72.3	*	1.25e3	*
		20	25.0%	*	24.5%	*	19.9%	*	0:50	38.9	*	5.85e2	*
Interfaces intermittentes	Epidemic	3	99.6%	1.00	98.9%	1.00	93.3%	0.98	0:50	506.8	0.79	6.15e5	0.73
		5	74.4%	1.01	73.8%	1.00	68.6%	0.95	0:28	282.0	0.87	3.07e5	0.77
		20	32.7%	0.97	32.2%	0.96	28.2%	0.86	0:50	76.7	0.71	6.97e4	0.62
	SnW	3	99.6%	1.00	98.8%	0.99	90.9%	0.95	0:56	79.9	0.79	1.65e3	0.80
		5	68.3%	0.98	67.4%	0.97	59.7%	0.95	0:45	57.5	0.79	1.07e3	0.85
		20	24.6%	0.98	24.1%	0.99	19.7%	0.99	0:50	27.0	0.69	4.45e2	0.76
Vitesse variable	Epidemic	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		5	74.4%	1.01	74.0%	1.00	70.5%	0.98	0:26	402.5	1.24	5.04e5	1.26
		20	34.9%	1.03	34.8%	1.03	33.6%	1.02	0:51	126.6	1.18	1.37e5	1.21
	SnW	3	99.7%	1.00	99.3%	1.00	95.5%	1.00	0:56	116.5	1.16	2.57e3	1.24
		5	69.2%	0.99	68.8%	0.99	64.4%	1.02	0:50	87.3	1.21	1.64e3	1.31
		20	24.2%	0.97	23.9%	0.98	20.8%	1.05	0:53	42.9	1.10	6.79e2	1.16
Choix PC aléatoire	Epidemic	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		5	99.3%	1.35	98.9%	1.34	95.1%	1.32	0:56	564.4	1.74	7.60e5	1.90
		20	98.1%	2.90	97.8%	2.90	94.8%	2.88	1:01	286.9	2.66	3.73e5	3.31
	SnW	3	99.8%	1.00	99.5%	1.00	97.1%	1.02	0:55	101.6	1.01	2.39e3	1.15
		5	98.2%	1.41	97.0%	1.40	86.3%	1.37	1:05	85.8	1.19	1.86e3	1.49
		20	85.0%	3.40	81.1%	3.31	46.4%	2.33	1:06	54.4	1.40	1.06e3	1.82
Véhicules Wi-Fi / Spray and Wait	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60

RR : Risque Relatif par rapport au scénario de référence
Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

TABLEAU A.1 – Résultats complets du chapitre 5 (90 % de porteurs mobiles)
valeurs en fin de simulation (cont.)

		Nb de PC	BlueTooth										
			Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData	
			valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR
Référence	Epidemic	3	97.6%	*	94.9%	*	70.6%	*	0:58	23.0	*	1.61e4	*
		5	65.0%	*	63.1%	*	45.9%	*	0:46	13.4	*	6.00e3	*
		20	20.3%	*	19.6%	*	13.4%	*	0:51	10.3	*	3.73e3	*
	SnW	3	97.9%	*	95.3%	*	72.3%	*	0:58	13.9	*	3.56e2	*
		5	62.5%	*	60.7%	*	44.6%	*	0:46	11.1	*	2.63e2	*
		20	19.3%	*	18.8%	*	13.6%	*	0:51	5.5	*	1.35e2	*
Interfaces intermittentes	Epidemic	3	94.5%	0.97	90.0%	0.95	49.5%	0.70	1:13	13.5	0.59	4.40e3	0.27
		5	61.1%	0.94	58.3%	0.92	33.1%	0.72	1:26	8.0	0.59	1.03e3	0.17
		20	17.9%	0.88	17.0%	0.86	8.6%	0.64	1:30	3.3	0.31	3.18e2	0.09
	SnW	3	94.6%	0.97	89.9%	0.94	47.8%	0.66	1:08	8.9	0.64	2.55e2	0.72
		5	60.8%	0.97	57.8%	0.95	31.1%	0.70	1:18	6.2	0.56	1.74e2	0.66
		20	18.0%	0.93	17.3%	0.92	10.8%	0.80	1:20	2.7	0.48	7.53e1	0.56
Vitesse variable	Epidemic	3	98.1%	1.00	95.2%	1.00	69.2%	0.98	0:58	82.3	3.57	8.11e4	5.04
		5	65.1%	1.00	63.3%	1.00	47.2%	1.03	0:46	41.7	3.10	3.21e4	5.35
		20	20.0%	0.99	19.5%	1.00	14.9%	1.11	0:53	11.9	1.15	4.53e3	1.22
	SnW	3	97.9%	1.00	95.1%	1.00	69.4%	0.96	1:01	34.4	2.48	1.02e3	2.88
		5	64.4%	1.03	62.3%	1.03	43.5%	0.98	0:48	24.8	2.24	6.60e2	2.51
		20	20.1%	1.04	19.4%	1.03	13.3%	0.98	0:55	9.8	1.79	2.55e2	1.90
Choix PC aléatoire	Epidemic	3	98.4%	1.01	96.1%	1.01	74.9%	1.06	1:00	59.8	2.60	7.01e4	4.36
		5	94.1%	1.45	92.2%	1.46	74.5%	1.62	1:05	68.6	5.11	8.31e4	13.86
		20	87.6%	4.31	85.9%	4.38	70.3%	5.25	1:08	49.7	4.81	6.05e4	16.23
	SnW	3	98.4%	1.00	95.9%	1.01	73.8%	1.02	1:01	17.9	1.29	5.48e2	1.54
		5	92.6%	1.48	90.2%	1.49	69.0%	1.55	1:10	19.7	1.78	5.84e2	2.22
		20	66.3%	3.43	63.3%	3.37	36.5%	2.69	1:13	14.1	2.56	3.82e2	2.84
Véhicules Bluetooth / Epidemic	$P_{pre\text{Warned}} = 0, 8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0, 2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

TABLEAU A.2 – Scénario de référence – valeurs en fin de simulation

		Nb de PC	Wi-Fi					
			Mobiles valeur	Tous valeur	Victimes valeur	Stab.	nMesg valeur	sData valeur
90 % mobiles	Epidemic	3	99.8%	99.3%	95.4%	0:46	638.9	8.43e5
		5	73.9%	73.7%	71.9%	0:30	324.9	3.99e5
		20	33.8%	33.8%	32.9%	0:50	107.7	1.13e5
	SnW	3	99.7%	99.3%	95.6%	0:55	100.9	2.07e3
		5	69.8%	69.1%	62.9%	0:45	72.3	1.25e3
		20	25.0%	24.5%	19.9%	0:50	38.9	5.85e2
70 % mobiles	Epidemic	3	99.7%	98.1%	94.3%	0:46	456.3	5.88e5
		5	72.5%	71.1%	68.0%	0:30	232.4	2.73e5
		20	36.3%	35.5%	33.7%	0:50	93.6	9.14e4
	SnW	3	99.7%	97.6%	92.8%	0:56	76.4	1.44e3
		5	68.0%	65.9%	61.2%	0:45	58.4	9.64e2
		20	24.1%	22.7%	19.5%	0:50	33.4	4.71e2
50 % mobiles	Epidemic	3	99.7%	95.9%	92.2%	0:48	288.6	3.42e5
		5	73.6%	70.9%	68.1%	0:33	167.7	1.74e5
		20	31.8%	30.8%	29.9%	0:50	88.3	7.17e4
	SnW	3	99.7%	94.3%	89.0%	0:56	56.6	9.66e2
		5	67.9%	62.6%	57.3%	0:45	43.0	6.63e2
		20	24.0%	21.0%	18.0%	0:50	27.3	3.58e2
30 % mobiles	Epidemic	3	99.4%	91.5%	88.0%	0:55	205.4	1.94e5
		5	73.2%	67.7%	65.4%	0:38	137.3	1.07e5
		20	33.4%	31.2%	30.3%	0:50	100.7	6.21e4
	SnW	3	99.5%	84.0%	77.3%	0:56	36.7	5.27e2
		5	67.5%	54.4%	48.7%	0:45	28.8	3.98e2
		20	23.0%	17.3%	14.9%	0:50	20.2	2.36e2
10 % mobiles	Epidemic	3	99.2%	78.4%	76.1%	0:55	152.2	8.31e4
		5	71.2%	57.6%	56.1%	0:41	122.1	6.01e4
		20	30.5%	26.0%	25.5%	0:51	112.6	4.76e4
	SnW	3	99.1%	53.9%	48.9%	0:58	18.5	2.15e2
		5	64.9%	33.9%	30.4%	0:41	15.4	1.73e2
		20	21.3%	9.3%	8.0%	0:50	13.0	1.28e2

Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

TABLEAU A.2 – Scénario de référence – valeurs en fin de simulation (cont.)

		Nb de PC	Mobiles valeur	Tous valeur	BlueTooth Victimes valeur	Stab.	nMesg valeur	sData valeur
90 % mobiles	Epidemic	3	97.6%	94.9%	70.6%	0:58	23.0	1.61e4
		5	65.0%	63.1%	45.9%	0:46	13.4	6.00e3
		20	20.3%	19.6%	13.4%	0:51	10.3	3.73e3
	SnW	3	97.9%	95.3%	72.3%	0:58	13.9	3.56e2
		5	62.5%	60.7%	44.6%	0:46	11.1	2.63e2
		20	19.3%	18.8%	13.6%	0:51	5.5	1.35e2
70 % mobiles	Epidemic	3	98.0%	88.4%	66.0%	0:58	21.8	1.79e4
		5	65.3%	58.5%	42.6%	0:46	13.2	7.72e3
		20	20.4%	18.7%	14.7%	0:51	5.9	1.74e3
	SnW	3	97.8%	88.2%	65.6%	0:58	12.4	2.98e2
		5	63.9%	57.1%	41.3%	0:45	9.5	2.25e2
		20	19.5%	17.7%	13.4%	0:51	5.2	1.23e2
50 % mobiles	Epidemic	3	97.6%	77.9%	58.2%	0:58	16.0	1.23e4
		5	63.2%	51.2%	39.2%	0:45	9.6	5.07e3
		20	21.0%	17.1%	13.2%	0:51	4.9	1.32e3
	SnW	3	97.9%	78.3%	58.6%	0:58	10.6	2.41e2
		5	63.6%	50.8%	38.1%	0:46	7.8	1.79e2
		20	19.9%	15.6%	11.2%	0:51	4.3	1.02e2
30 % mobiles	Epidemic	3	97.4%	64.6%	50.5%	0:58	10.0	6.84e3
		5	63.3%	41.3%	31.9%	0:45	6.1	2.59e3
		20	20.2%	13.1%	10.1%	0:51	3.4	6.59e2
	SnW	3	97.1%	63.2%	48.7%	0:58	6.9	1.53e2
		5	63.1%	40.9%	31.4%	0:46	5.4	1.25e2
		20	18.8%	12.5%	9.7%	0:51	3.2	7.52e1
10 % mobiles	Epidemic	3	96.3%	38.4%	32.0%	0:58	3.4	1.42e3
		5	62.0%	23.0%	18.7%	0:51	2.6	6.60e2
		20	19.1%	6.5%	5.1%	0:51	1.7	1.82e2
	SnW	3	97.2%	37.7%	31.1%	0:58	2.9	6.96e1
		5	62.3%	23.1%	18.8%	0:50	2.2	5.39e1
		20	18.6%	6.7%	5.4%	0:51	1.5	3.79e1

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

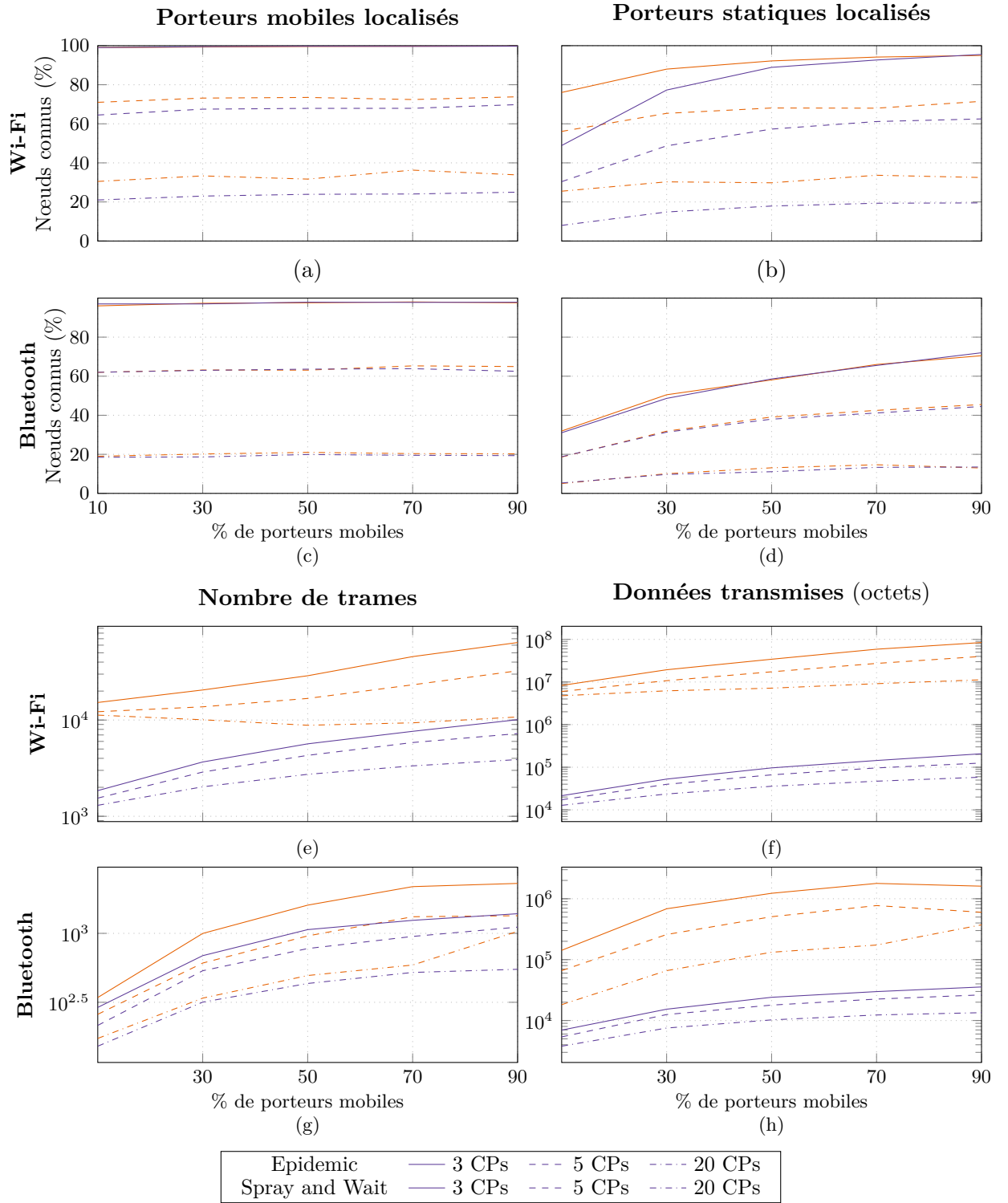


FIGURE A.1 – Scénario de référence

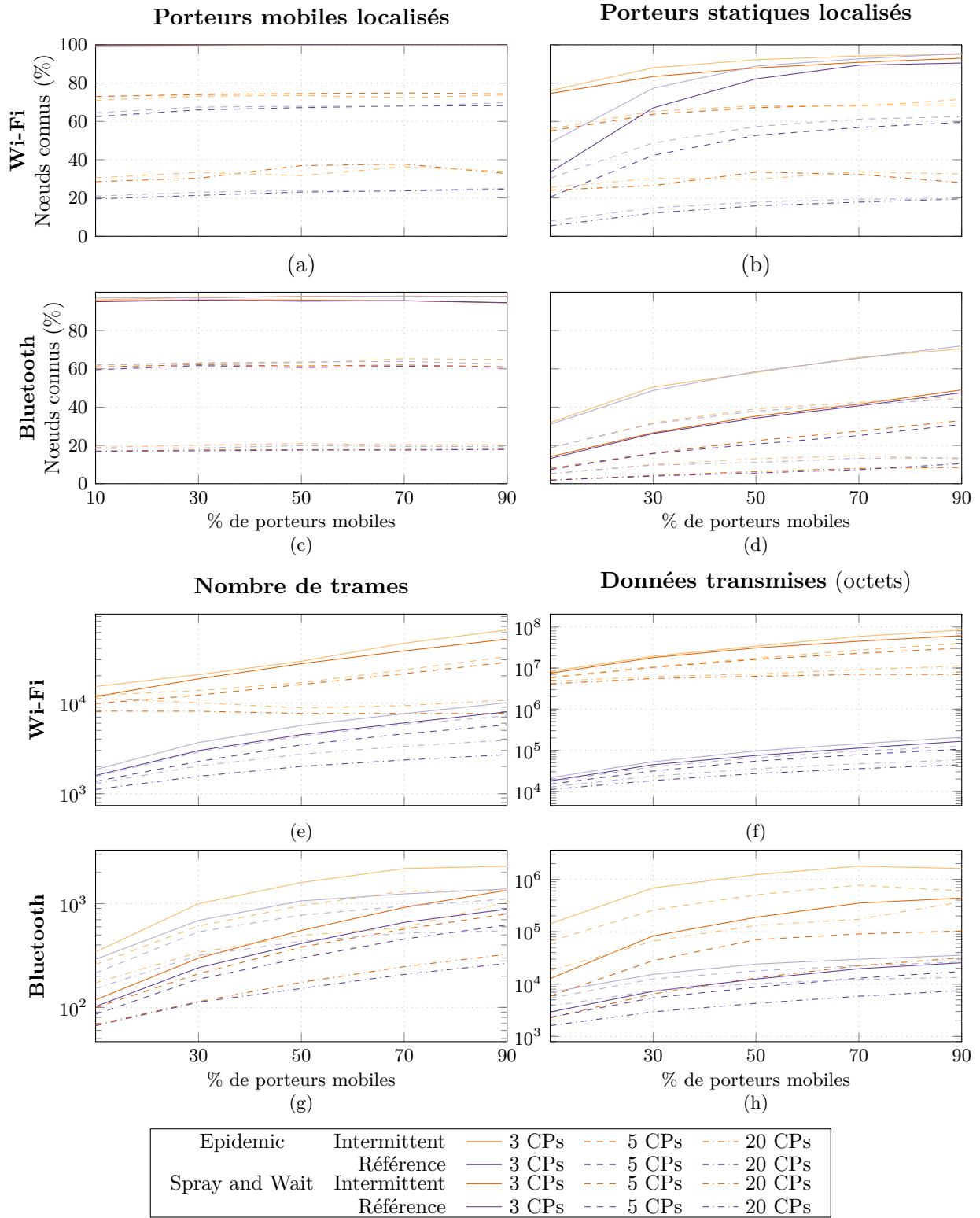


FIGURE A.2 – Interface intermittente

TABLEAU A.3 – Interfaces intermittentes – valeurs en fin de simulation

		Nb de PC	Wi-Fi										
			Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData	
			valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR
90 % mobiles	Epidemic	3	99.6%	1.00	98.9%	1.00	93.3%	0.98	0:50	506.8	0.79	6.15e5	0.73
		5	74.4%	1.01	73.8%	1.00	68.6%	0.95	0:28	282.0	0.87	3.07e5	0.77
		20	32.7%	0.97	32.2%	0.96	28.2%	0.86	0:50	76.7	0.71	6.97e4	0.62
	SnW	3	99.6%	1.00	98.8%	0.99	90.9%	0.95	0:56	79.9	0.79	1.65e3	0.80
		5	68.3%	0.98	67.4%	0.97	59.7%	0.95	0:45	57.5	0.79	1.07e3	0.85
		20	24.6%	0.98	24.1%	0.99	19.7%	0.99	0:50	27.0	0.69	4.45e2	0.76
70 % mobiles	Epidemic	3	99.5%	1.00	96.9%	0.99	90.9%	0.96	0:48	375.3	0.82	4.49e5	0.76
		5	74.9%	1.03	73.0%	1.03	68.5%	1.01	0:28	210.6	0.91	2.28e5	0.83
		20	37.7%	1.04	36.2%	1.02	32.5%	0.97	0:50	76.8	0.82	7.02e4	0.77
	SnW	3	99.6%	1.00	96.5%	0.99	89.5%	0.96	0:56	60.4	0.79	1.13e3	0.78
		5	68.1%	1.00	64.8%	0.98	57.0%	0.93	0:48	45.8	0.78	7.84e2	0.81
		20	23.8%	0.98	22.0%	0.97	17.9%	0.92	0:50	23.6	0.71	3.58e2	0.76
50 % mobiles	Epidemic	3	99.6%	1.00	93.8%	0.98	87.9%	0.95	0:48	271.9	0.94	3.08e5	0.90
		5	74.6%	1.01	70.9%	1.00	67.2%	0.99	0:30	159.9	0.95	1.62e5	0.93
		20	37.0%	1.16	35.2%	1.14	33.5%	1.12	0:50	76.8	0.87	6.30e4	0.88
	SnW	3	99.6%	1.00	90.9%	0.96	82.2%	0.92	0:56	44.8	0.79	7.48e2	0.77
		5	67.2%	0.99	60.0%	0.96	52.8%	0.92	0:46	34.6	0.80	5.44e2	0.82
		20	23.1%	0.97	19.6%	0.93	16.0%	0.89	0:50	20.0	0.73	2.72e2	0.76
30 % mobiles	Epidemic	3	99.7%	1.00	88.3%	0.97	83.5%	0.95	0:53	184.9	0.90	1.80e5	0.93
		5	74.0%	1.01	66.8%	0.99	63.7%	0.98	0:33	122.3	0.89	1.04e5	0.97
		20	30.4%	0.91	27.7%	0.89	26.6%	0.88	0:51	81.2	0.81	5.56e4	0.89
	SnW	3	99.6%	1.00	76.9%	0.92	67.1%	0.87	0:56	29.9	0.81	4.47e2	0.85
		5	66.1%	0.98	49.4%	0.91	42.3%	0.87	0:43	22.7	0.79	3.13e2	0.79
		20	21.3%	0.93	14.9%	0.86	12.2%	0.82	0:51	15.6	0.77	1.84e2	0.78
10 % mobiles	Epidemic	3	99.7%	1.00	77.1%	0.98	74.6%	0.98	0:53	117.7	0.77	7.46e4	0.90
		5	73.2%	1.03	56.9%	0.99	55.1%	0.98	0:36	98.4	0.81	5.83e4	0.97
		20	28.7%	0.94	24.6%	0.94	24.1%	0.94	0:51	81.4	0.72	4.13e4	0.87
	SnW	3	99.6%	1.01	40.1%	0.74	33.5%	0.68	0:56	15.9	0.86	1.80e2	0.84
		5	63.0%	0.97	24.8%	0.73	20.5%	0.68	0:41	13.7	0.88	1.50e2	0.87
		20	19.5%	0.92	6.9%	0.74	5.5%	0.68	0:51	11.1	0.86	1.11e2	0.87

RR : Risque Relatif par rapport au scénario de référence

Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

TABLEAU A.3 – Interfaces intermittentes – valeurs en fin de simulation (cont.)

		Nb de PC	BlueTooth										
			Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData	
			valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR
90 % mobiles	Epidemic	3	94.5%	0.97	90.0%	0.95	49.5%	0.70	1:13	13.5	0.59	4.40e3	0.27
		5	61.1%	0.94	58.3%	0.92	33.1%	0.72	1:26	8.0	0.59	1.03e3	0.17
		20	17.9%	0.88	17.0%	0.86	8.6%	0.64	1:30	3.3	0.31	3.18e2	0.09
	SnW	3	94.6%	0.97	89.9%	0.94	47.8%	0.66	1:08	8.9	0.64	2.55e2	0.72
		5	60.8%	0.97	57.8%	0.95	31.1%	0.70	1:18	6.2	0.56	1.74e2	0.66
		20	18.0%	0.93	17.3%	0.92	10.8%	0.80	1:20	2.7	0.48	7.53e1	0.56
70 % mobiles	Epidemic	3	95.5%	0.97	79.3%	0.90	41.6%	0.63	1:05	9.2	0.42	3.51e3	0.20
		5	62.0%	0.95	51.7%	0.88	27.5%	0.65	1:01	5.7	0.43	9.08e2	0.12
		20	17.9%	0.88	15.0%	0.80	8.1%	0.55	0:56	2.5	0.42	2.24e2	0.13
	SnW	3	95.6%	0.98	79.1%	0.90	40.7%	0.62	1:06	6.6	0.53	1.96e2	0.66
		5	61.4%	0.96	50.6%	0.89	25.3%	0.61	1:03	4.6	0.48	1.30e2	0.58
		20	17.6%	0.90	14.5%	0.82	7.3%	0.55	1:10	2.1	0.40	5.87e1	0.48
50 % mobiles	Epidemic	3	96.0%	0.98	65.7%	0.84	35.4%	0.61	1:05	5.5	0.34	1.88e3	0.15
		5	61.5%	0.97	42.0%	0.82	22.6%	0.58	0:56	3.8	0.40	7.03e2	0.14
		20	17.8%	0.84	12.1%	0.71	6.4%	0.49	0:55	1.7	0.35	1.31e2	0.10
	SnW	3	95.3%	0.97	64.8%	0.83	34.4%	0.59	1:03	4.1	0.39	1.25e2	0.52
		5	60.7%	0.95	40.7%	0.80	20.8%	0.55	0:55	3.0	0.39	8.74e1	0.49
		20	17.7%	0.89	11.7%	0.75	5.7%	0.51	0:51	1.5	0.35	4.30e1	0.42
30 % mobiles	Epidemic	3	96.0%	0.99	47.5%	0.74	26.7%	0.53	1:01	3.0	0.30	8.29e2	0.12
		5	62.3%	0.98	29.9%	0.72	16.0%	0.50	0:51	2.1	0.35	2.80e2	0.11
		20	17.8%	0.88	8.3%	0.64	4.3%	0.43	0:51	1.1	0.34	6.51e1	0.10
	SnW	3	95.9%	0.99	47.1%	0.75	26.2%	0.54	1:01	2.4	0.35	7.30e1	0.48
		5	61.7%	0.98	29.6%	0.72	15.8%	0.50	0:53	1.9	0.35	5.48e1	0.44
		20	17.3%	0.92	8.0%	0.64	4.0%	0.41	0:51	1.1	0.35	2.96e1	0.39
10 % mobiles	Epidemic	3	95.9%	1.00	22.3%	0.58	14.2%	0.44	1:03	1.2	0.35	1.27e2	0.09
		5	61.2%	0.99	13.3%	0.58	8.0%	0.43	0:51	1.0	0.38	5.93e1	0.09
		20	17.5%	0.91	3.5%	0.53	1.9%	0.38	0:51	0.7	0.39	2.27e1	0.12
	SnW	3	95.1%	0.98	21.4%	0.57	13.2%	0.42	1:01	1.0	0.35	2.93e1	0.42
		5	59.8%	0.96	12.7%	0.55	7.4%	0.40	0:51	0.9	0.40	2.33e1	0.43
		20	17.2%	0.92	3.4%	0.51	1.9%	0.35	0:51	0.7	0.44	1.61e1	0.42

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

TABLEAU A.4 – Vitesse variable – valeurs en fin de simulation

		Nb de PC	Wi-Fi										
			Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData	
			valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR
90 % mobiles	Epidemic	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		5	74.4%	1.01	74.0%	1.00	70.5%	0.98	0:26	402.5	1.24	5.04e5	1.26
		20	34.9%	1.03	34.8%	1.03	33.6%	1.02	0:51	126.6	1.18	1.37e5	1.21
	SnW	3	99.7%	1.00	99.3%	1.00	95.5%	1.00	0:56	116.5	1.16	2.57e3	1.24
		5	69.2%	0.99	68.8%	0.99	64.4%	1.02	0:50	87.3	1.21	1.64e3	1.31
		20	24.2%	0.97	23.9%	0.98	20.8%	1.05	0:53	42.9	1.10	6.79e2	1.16
70 % mobiles	Epidemic	3	99.7%	1.00	98.1%	1.00	94.4%	1.00	0:45	562.7	1.23	7.38e5	1.25
		5	75.7%	1.04	74.4%	1.05	71.4%	1.05	0:33	289.4	1.25	3.50e5	1.28
		20	35.6%	0.98	35.0%	0.99	33.5%	1.00	0:55	100.2	1.07	1.00e5	1.10
	SnW	3	99.7%	1.00	98.0%	1.00	94.1%	1.01	0:58	87.0	1.14	1.75e3	1.22
		5	67.6%	0.99	65.5%	0.99	60.6%	0.99	0:48	65.2	1.12	1.14e3	1.18
		20	24.4%	1.01	22.8%	1.00	19.1%	0.98	0:55	35.3	1.06	5.28e2	1.12
50 % mobiles	Epidemic	3	99.8%	1.00	95.6%	1.00	91.4%	0.99	0:46	362.2	1.25	4.44e5	1.30
		5	73.6%	1.00	70.8%	1.00	68.0%	1.00	0:30	195.2	1.16	2.12e5	1.22
		20	35.9%	1.13	34.7%	1.13	33.5%	1.12	0:55	99.0	1.12	8.22e4	1.15
	SnW	3	99.8%	1.00	94.3%	1.00	88.8%	1.00	1:00	63.4	1.12	1.16e3	1.20
		5	67.9%	1.00	62.3%	0.99	56.6%	0.99	0:48	46.6	1.08	7.51e2	1.13
		20	23.3%	0.97	20.6%	0.98	17.9%	1.00	0:55	28.1	1.03	3.81e2	1.06
30 % mobiles	Epidemic	3	99.6%	1.00	91.3%	1.00	87.7%	1.00	0:55	241.3	1.17	2.44e5	1.26
		5	74.2%	1.01	67.9%	1.00	65.3%	1.00	0:36	147.7	1.08	1.22e5	1.13
		20	34.1%	1.02	32.0%	1.02	31.1%	1.03	0:58	104.4	1.04	6.54e4	1.05
	SnW	3	99.6%	1.00	83.7%	1.00	76.9%	1.00	1:01	39.7	1.08	6.40e2	1.21
		5	67.2%	1.00	54.1%	1.00	48.5%	1.00	0:48	30.6	1.06	4.32e2	1.09
		20	23.7%	1.03	17.6%	1.01	14.9%	1.00	0:55	21.1	1.04	2.49e2	1.05
10 % mobiles	Epidemic	3	99.4%	1.00	79.1%	1.01	76.8%	1.01	1:00	155.3	1.02	8.69e4	1.05
		5	72.6%	1.02	58.2%	1.01	56.6%	1.01	0:46	128.3	1.05	6.12e4	1.02
		20	25.9%	0.85	23.0%	0.89	22.7%	0.89	0:55	107.6	0.96	4.44e4	0.93
	SnW	3	99.2%	1.00	53.0%	0.98	47.9%	0.98	1:01	18.6	1.01	2.16e2	1.01
		5	63.4%	0.98	31.6%	0.93	28.0%	0.92	0:45	16.1	1.04	1.78e2	1.03
		20	20.0%	0.94	9.2%	0.99	8.0%	1.00	0:53	12.9	0.99	1.29e2	1.01

RR : Risque Relatif par rapport au scénario de référence

Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

TABLEAU A.4 – Vitesse variable – valeurs en fin de simulation (cont.)

		Nb de PC	BlueTooth										
			Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData	
			valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR
90 % mobiles	Epidemic	3	98.1%	1.00	95.2%	1.00	69.2%	0.98	0:58	82.3	3.57	8.11e4	5.04
		5	65.1%	1.00	63.3%	1.00	47.2%	1.03	0:46	41.7	3.10	3.21e4	5.35
		20	20.0%	0.99	19.5%	1.00	14.9%	1.11	0:53	11.9	1.15	4.53e3	1.22
	SnW	3	97.9%	1.00	95.1%	1.00	69.4%	0.96	1:01	34.4	2.48	1.02e3	2.88
		5	64.4%	1.03	62.3%	1.03	43.5%	0.98	0:48	24.8	2.24	6.60e2	2.51
		20	20.1%	1.04	19.4%	1.03	13.3%	0.98	0:55	9.8	1.79	2.55e2	1.90
70 % mobiles	Epidemic	3	97.8%	1.00	87.9%	0.99	65.0%	0.98	0:58	58.0	2.66	5.72e4	3.21
		5	64.9%	0.99	58.5%	1.00	43.4%	1.02	0:46	29.9	2.26	2.31e4	2.99
		20	20.8%	1.02	18.8%	1.01	14.0%	0.96	0:53	9.4	1.59	3.57e3	2.05
	SnW	3	98.0%	1.00	88.0%	1.00	64.7%	0.99	1:01	25.3	2.04	7.07e2	2.37
		5	63.4%	0.99	56.9%	1.00	41.8%	1.01	0:48	17.8	1.88	4.66e2	2.07
		20	18.7%	0.96	17.1%	0.97	13.3%	0.99	0:53	7.6	1.47	1.92e2	1.56
50 % mobiles	Epidemic	3	97.6%	1.00	78.8%	1.01	59.9%	1.03	1:00	32.2	2.01	2.92e4	2.38
		5	64.8%	1.03	51.6%	1.01	38.5%	0.98	0:46	17.8	1.85	1.21e4	2.39
		20	20.5%	0.98	16.5%	0.97	12.5%	0.95	0:58	6.4	1.29	1.98e3	1.50
	SnW	3	97.5%	1.00	77.9%	1.00	58.3%	1.00	1:01	15.8	1.49	4.36e2	1.81
		5	62.7%	0.98	50.0%	0.98	37.4%	0.98	0:50	12.2	1.57	3.03e2	1.69
		20	19.3%	0.97	15.3%	0.98	11.2%	1.00	0:53	5.7	1.31	1.38e2	1.35
30 % mobiles	Epidemic	3	97.7%	1.00	64.3%	1.00	49.9%	0.99	1:00	15.9	1.59	1.26e4	1.84
		5	63.4%	1.00	41.5%	1.01	32.2%	1.01	0:48	9.4	1.54	5.39e3	2.09
		20	20.9%	1.03	13.8%	1.05	10.7%	1.06	0:56	4.1	1.21	9.66e2	1.46
	SnW	3	97.4%	1.00	63.9%	1.01	49.5%	1.02	1:03	9.3	1.35	2.30e2	1.50
		5	62.1%	0.98	40.0%	0.98	30.5%	0.97	0:50	6.8	1.27	1.64e2	1.31
		20	18.8%	1.00	12.4%	0.99	9.6%	0.99	0:53	3.6	1.15	8.87e1	1.18
10 % mobiles	Epidemic	3	96.6%	1.00	37.5%	0.98	30.9%	0.97	1:03	3.9	1.14	1.75e3	1.23
		5	62.2%	1.00	23.6%	1.03	19.3%	1.03	0:53	3.0	1.15	8.47e2	1.28
		20	20.1%	1.05	7.1%	1.09	5.6%	1.10	0:56	1.8	1.05	2.09e2	1.14
	SnW	3	97.4%	1.00	38.0%	1.01	31.4%	1.01	1:03	3.2	1.10	7.89e1	1.13
		5	59.7%	0.96	22.5%	0.97	18.3%	0.98	0:50	2.4	1.11	5.97e1	1.11
		20	18.2%	0.97	6.4%	0.96	5.1%	0.96	1:00	1.5	1.00	3.87e1	1.02

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

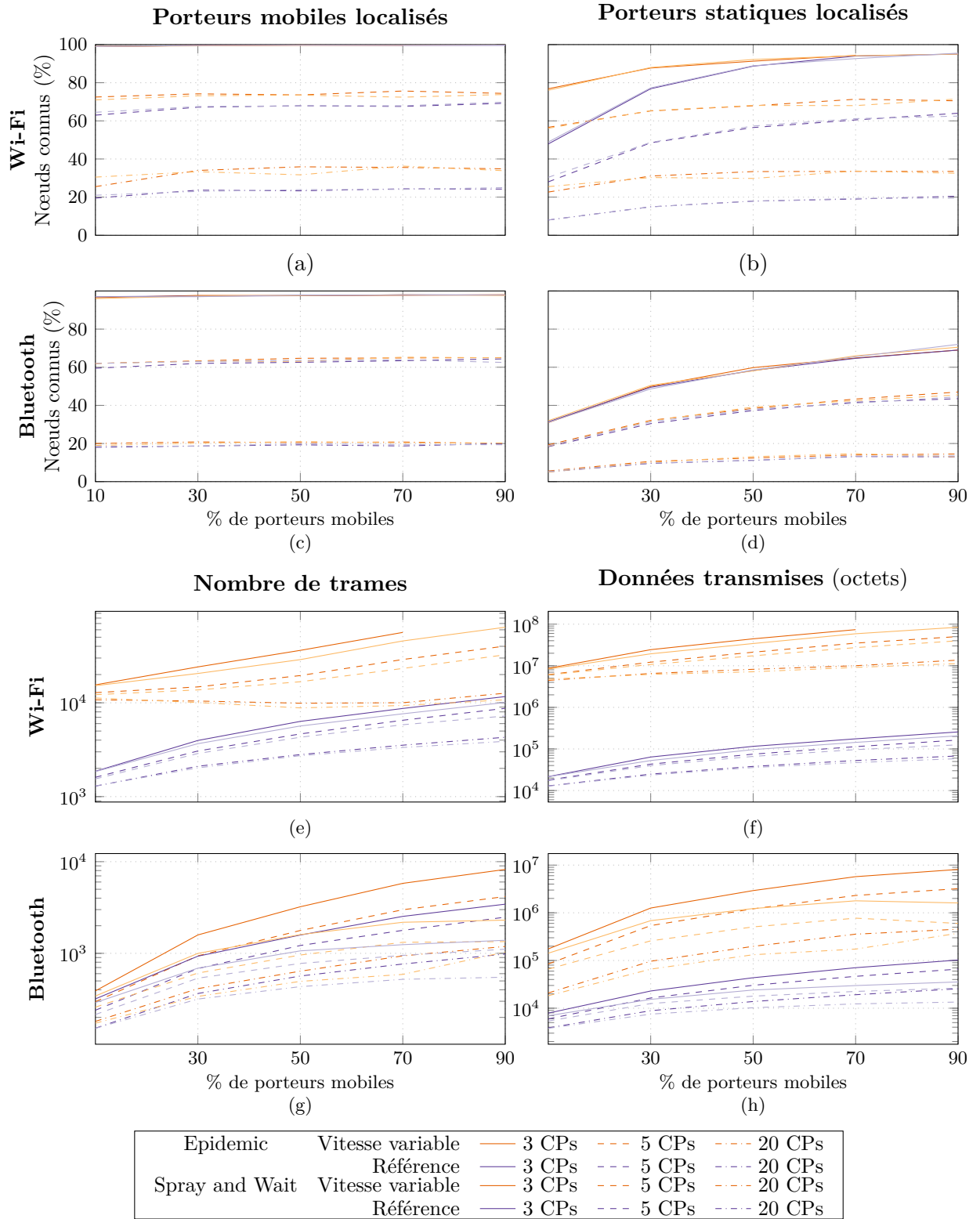


FIGURE A.3 – Vitesse de marche variable

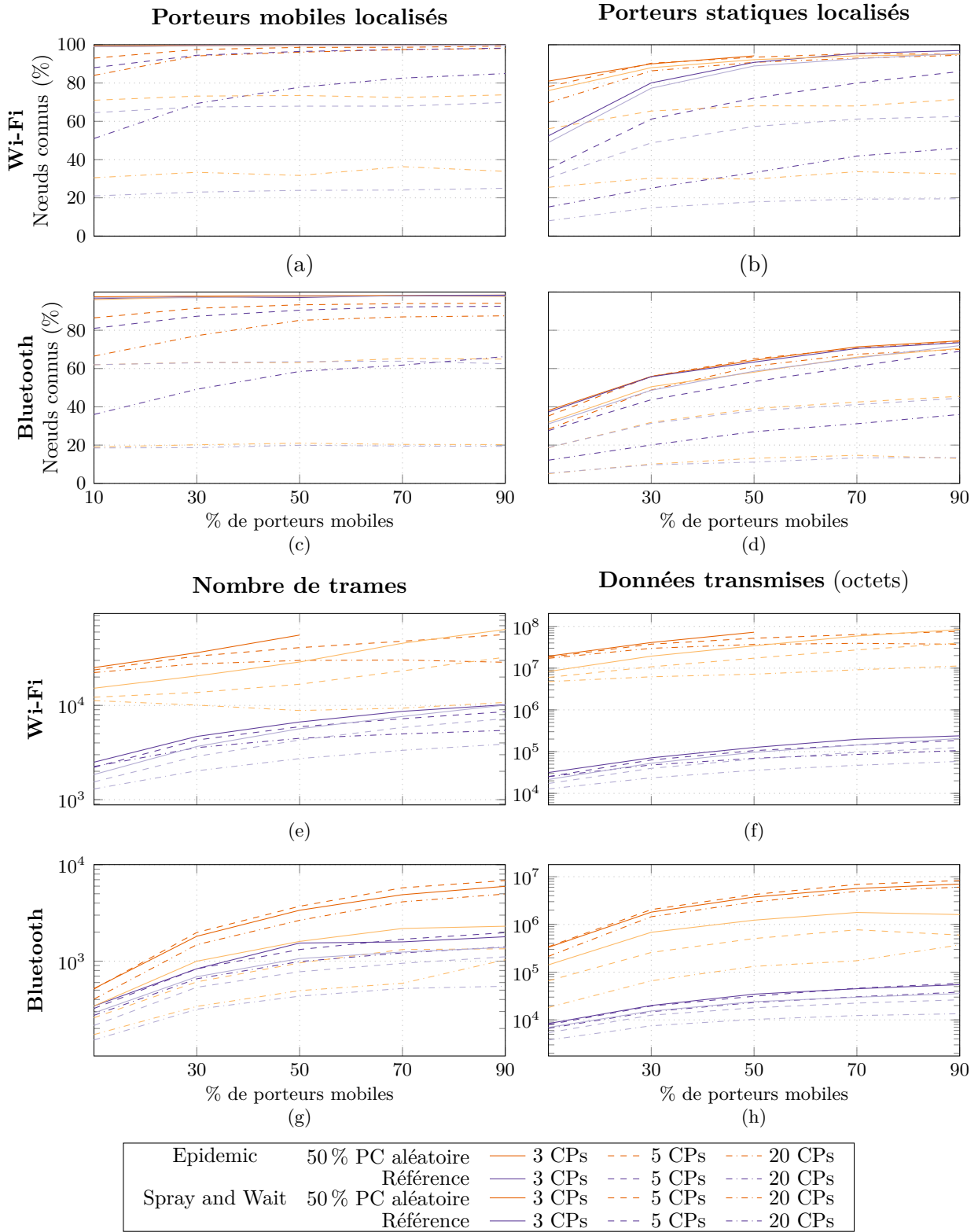


FIGURE A.4 – Nearest vs. Random CP (RR)

TABLEAU A.5 – Choix aléatoire du point de convergence – valeurs en fin de simulation

		Nb de PC	Wi-Fi										
			Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData	
			valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR
90 % mobiles	Epidemic	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		5	99.3%	1.35	98.9%	1.34	95.1%	1.32	0:56	564.4	1.74	7.60e5	1.90
		20	98.1%	2.90	97.8%	2.90	94.8%	2.88	1:01	286.9	2.66	3.73e5	3.31
	SnW	3	99.8%	1.00	99.5%	1.00	97.1%	1.02	0:55	101.6	1.01	2.39e3	1.15
		5	98.2%	1.41	97.0%	1.40	86.3%	1.37	1:05	85.8	1.19	1.86e3	1.49
		20	85.0%	3.40	81.1%	3.31	46.4%	2.33	1:06	54.4	1.40	1.06e3	1.82
70 % mobiles	Epidemic	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		5	98.7%	1.36	97.7%	1.37	95.5%	1.40	1:00	479.6	2.06	6.37e5	2.33
		20	97.5%	2.69	96.2%	2.71	93.0%	2.76	0:58	303.0	3.24	3.93e5	4.30
	SnW	3	99.8%	1.00	98.5%	1.01	95.6%	1.03	0:56	86.6	1.13	1.98e3	1.37
		5	97.5%	1.43	92.3%	1.40	80.0%	1.31	1:08	72.3	1.24	1.44e3	1.49
		20	82.6%	3.42	70.4%	3.10	41.8%	2.15	1:11	49.9	1.49	8.57e2	1.82
50 % mobiles	Epidemic	3	99.7%	1.00	97.0%	1.01	94.3%	1.02	0:53	557.3	1.93	7.25e5	2.12
		5	98.6%	1.34	96.1%	1.36	93.6%	1.37	1:03	410.2	2.45	5.20e5	3.00
		20	96.2%	3.03	93.5%	3.03	90.9%	3.04	1:03	299.9	3.40	3.70e5	5.16
	SnW	3	99.8%	1.00	95.3%	1.01	90.9%	1.02	0:58	66.7	1.18	1.26e3	1.30
		5	96.5%	1.42	84.4%	1.35	72.2%	1.26	1:08	59.4	1.38	1.06e3	1.59
		20	77.9%	3.25	55.5%	2.65	33.2%	1.85	1:11	44.8	1.64	6.95e2	1.94
30 % mobiles	Epidemic	3	99.8%	1.00	92.9%	1.02	90.0%	1.02	0:55	362.1	1.76	4.10e5	2.12
		5	97.5%	1.33	92.5%	1.37	90.4%	1.38	1:08	333.6	2.43	3.75e5	3.49
		20	94.2%	2.82	88.7%	2.84	86.4%	2.85	1:08	276.0	2.74	2.99e5	4.82
	SnW	3	99.6%	1.00	86.0%	1.02	80.1%	1.04	1:05	46.9	1.28	7.11e2	1.35
		5	94.5%	1.40	71.2%	1.31	61.2%	1.26	1:11	42.9	1.49	6.32e2	1.59
		20	69.5%	3.02	38.4%	2.22	25.1%	1.69	1:08	35.6	1.76	4.80e2	2.04
10 % mobiles	Epidemic	3	99.9%	1.01	82.9%	1.06	81.0%	1.07	0:58	251.6	1.65	1.93e5	2.33
		5	93.4%	1.31	79.7%	1.38	78.2%	1.39	1:08	237.7	1.95	1.82e5	3.03
		20	84.1%	2.75	71.2%	2.74	69.7%	2.73	1:08	223.0	1.98	1.72e5	3.61
	SnW	3	99.4%	1.00	57.1%	1.06	52.4%	1.07	1:10	25.0	1.35	3.16e2	1.47
		5	88.1%	1.36	40.4%	1.19	35.1%	1.15	1:13	22.1	1.43	2.53e2	1.47
		20	51.3%	2.41	18.8%	2.02	15.2%	1.90	1:06	22.5	1.73	2.51e2	1.96

RR : Risque Relatif par rapport au scénario de référence

Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

TABLEAU A.5 – Choix aléatoire du point de convergence – valeurs en fin de simulation
(cont.)

		Nb de	BlueTooth										
		PC	Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData	
			valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR
90 % mobiles	Epidemic	3	98.4%	1.01	96.1%	1.01	74.9%	1.06	1:00	59.8	2.60	7.01e4	4.36
		5	94.1%	1.45	92.2%	1.46	74.5%	1.62	1:05	68.6	5.11	8.31e4	13.86
		20	87.6%	4.31	85.9%	4.38	70.3%	5.25	1:08	49.7	4.81	6.05e4	16.23
	SnW	3	98.4%	1.00	95.9%	1.01	73.8%	1.02	1:01	17.9	1.29	5.48e2	1.54
		5	92.6%	1.48	90.2%	1.49	69.0%	1.55	1:10	19.7	1.78	5.84e2	2.22
		20	66.3%	3.43	63.3%	3.37	36.5%	2.69	1:13	14.1	2.56	3.82e2	2.84
70 % mobiles	Epidemic	3	98.2%	1.00	90.2%	1.02	71.5%	1.08	1:00	48.9	2.24	5.68e4	3.18
		5	94.0%	1.44	87.0%	1.49	70.7%	1.66	1:06	57.7	4.37	6.91e4	8.95
		20	87.0%	4.26	81.2%	4.34	67.5%	4.60	1:10	41.2	7.00	4.95e4	28.49
	SnW	3	98.1%	1.00	89.9%	1.02	70.6%	1.08	1:01	15.8	1.27	4.49e2	1.51
		5	92.2%	1.44	83.0%	1.45	61.3%	1.48	1:11	16.9	1.78	4.62e2	2.06
		20	61.8%	3.17	52.7%	2.98	31.3%	2.34	1:08	12.2	2.34	3.05e2	2.48
50 % mobiles	Epidemic	3	98.2%	1.01	81.3%	1.04	64.3%	1.11	1:00	33.7	2.11	3.76e4	3.06
		5	93.4%	1.48	79.3%	1.55	65.2%	1.66	1:10	37.1	3.87	4.24e4	8.37
		20	85.2%	4.06	73.3%	4.29	61.4%	4.67	1:08	26.5	5.36	2.96e4	22.42
	SnW	3	97.1%	0.99	80.3%	1.03	63.4%	1.08	1:01	15.4	1.45	3.46e2	1.44
		5	90.6%	1.42	71.9%	1.41	53.3%	1.40	1:13	13.2	1.70	3.13e2	1.75
		20	58.5%	2.94	42.8%	2.75	27.0%	2.42	1:11	9.9	2.29	2.31e2	2.26
30 % mobiles	Epidemic	3	97.8%	1.00	68.5%	1.06	55.9%	1.11	1:01	18.1	1.81	1.81e4	2.65
		5	91.6%	1.45	66.7%	1.61	56.0%	1.75	1:13	19.8	3.26	2.05e4	7.92
		20	77.3%	3.82	57.4%	4.36	48.8%	4.84	1:23	14.8	4.37	1.45e4	21.99
	SnW	3	97.6%	1.01	68.3%	1.08	55.8%	1.15	1:06	8.3	1.21	2.00e2	1.31
		5	87.4%	1.38	56.8%	1.39	43.7%	1.39	1:15	8.3	1.55	1.95e2	1.56
		20	49.3%	2.62	28.9%	2.32	20.1%	2.07	1:08	6.6	2.07	1.48e2	1.97
10 % mobiles	Epidemic	3	97.8%	1.02	44.1%	1.15	38.1%	1.19	1:05	5.2	1.52	3.31e3	2.33
		5	86.8%	1.40	40.4%	1.76	35.3%	1.89	1:21	5.1	1.98	3.41e3	5.17
		20	67.0%	3.50	32.2%	4.95	28.3%	5.55	1:31	4.0	2.33	2.14e3	11.77
	SnW	3	96.9%	1.00	43.3%	1.15	37.3%	1.20	1:11	3.4	1.18	8.38e1	1.20
		5	81.3%	1.30	32.9%	1.42	27.6%	1.47	1:18	3.2	1.50	7.95e1	1.48
		20	36.0%	1.93	14.5%	2.17	12.1%	2.26	1:10	2.7	1.80	6.65e1	1.75

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

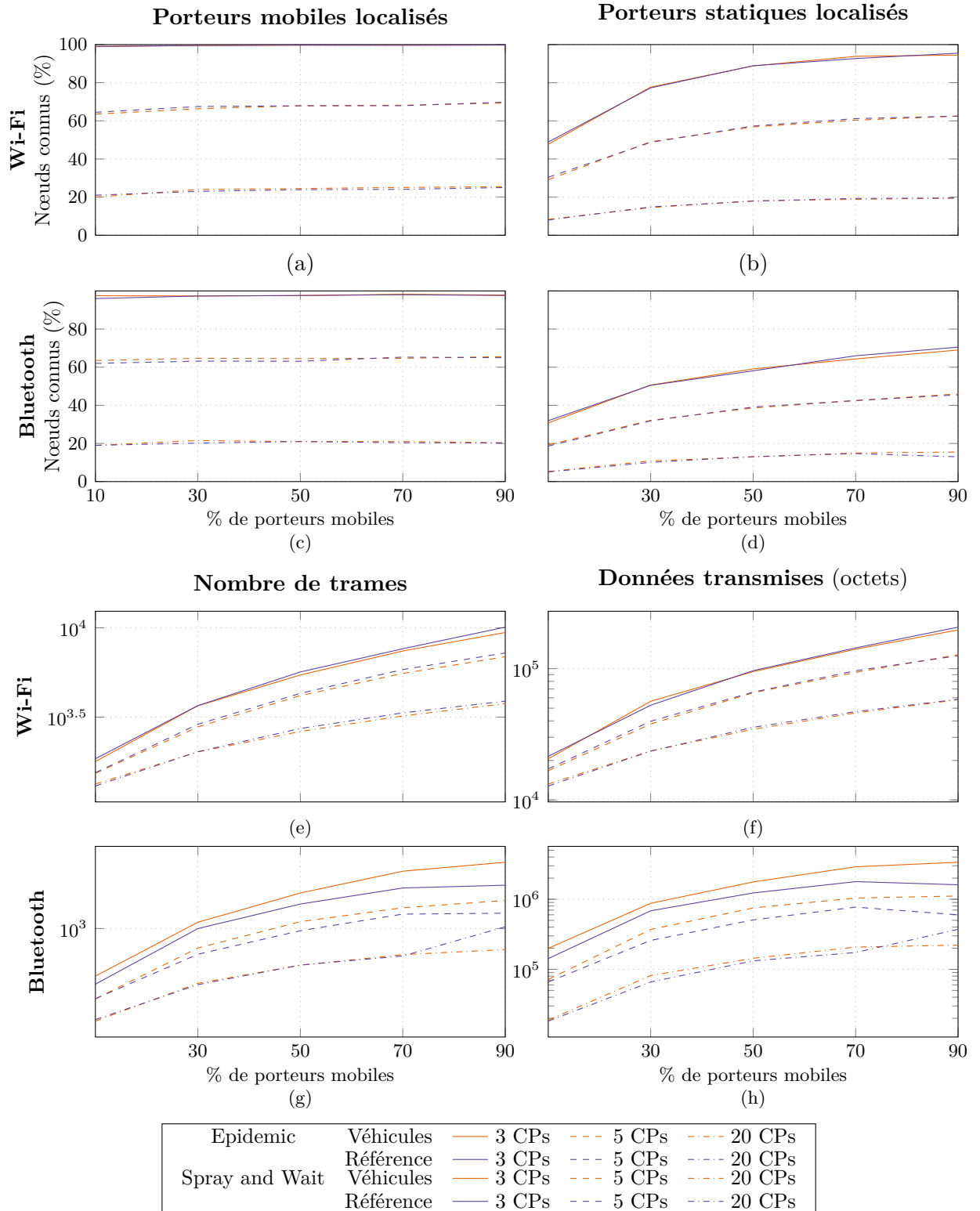


FIGURE A.5 – Véhicules

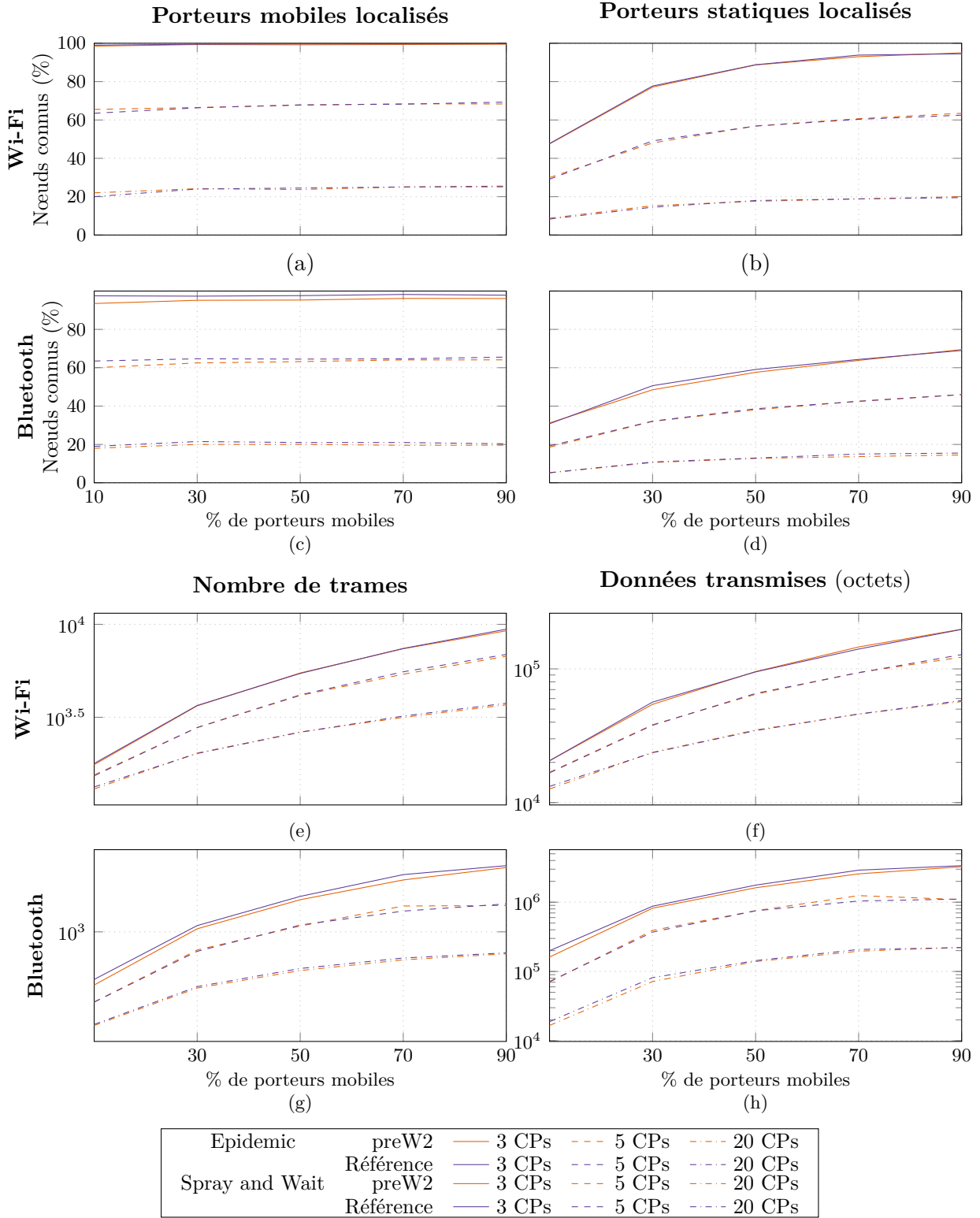


FIGURE A.6 – $P_{preWarned}=0.2$

TABLEAU A.6 – Véhicules – valeurs en fin de simulation

		Nb de PC	Véhicules Wi-Fi / Spray and Wait										
			Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData	
			valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR
90 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60
70 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60
50 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60
30 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60
10 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60

RR : Risque Relatif par rapport au scénario de référence

Mobiles, tous, victimes : proportions de porteurs localisés

TABLEAU A.6 – Véhicules – valeurs en fin de simulation (cont.)

	Nb de PC	Véhicules Bluetooth / Epidemic											
		Mobiles		Tous		Victimes		Stab.	nMesg		sData		
		valeur	RR	valeur	RR	valeur	RR		valeur	RR	valeur	RR	
90 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60
70 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60
50 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60
30 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60
10 % mobiles	$P_{pre\text{Warned}} = 0,8$	3	97.9%	1.00	95.0%	1.00	69.1%	0.98	0:58	35.8	1.56	3.37e4	2.10
		5	65.6%	1.01	63.7%	1.01	46.4%	1.01	0:46	17.2	1.28	1.11e4	1.85
		20	20.4%	1.00	19.9%	1.01	15.5%	1.16	0:51	6.7	0.65	2.21e3	0.59
	$P_{pre\text{Warned}} = 0,2$	3	96.1%	0.98	93.5%	0.98	69.6%	0.99	0:58	34.6	1.50	3.25e4	2.02
		5	64.1%	0.99	62.3%	0.99	46.3%	1.01	0:43	16.6	1.24	1.09e4	1.82
		20	19.6%	0.97	19.1%	0.98	14.6%	1.09	0:50	6.6	0.63	2.23e3	0.60

Stab. : temps de stabilisation à 98 %

nMesg : nombre de trames moyen par nœud ; sData : données transmises par nœud (octets)

Annexe B

Publications

Florent CORIAT et al. « Towards distributed geolocation for large scale disaster management ». In : WSDP - Chilean Workshop on Distributed and Parallel Systems. Talca, Chile, nov. 2014. URL : <http://hal.upmc.fr/hal-01104657> (visité le 13/02/2015).

Florent CORIAT et al. « Crowdsourcing-based architecture for post-disaster geolocation : A comparative performance evaluation ». In : *2016 IEEE 15th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*. The 15th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA 2016). Cambridge, Boston, MA, USA, 31 oct. 2016, p. 1-9. DOI : 10.1109/NCA.2016.7778583. URL : <http://hal.upmc.fr/hal-01416297/document> (visité le 28/03/2017).

Marwan GHANEM, Florent CORIAT et Lionel TABOURIER. « Ego-betweenness centrality in link streams ». In : *The 7th Workshop on Social Network Analysis in Applications (workshop ASONAM 2017)*. Sydney, Australia, juil. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01550340> (visité le 21/11/2017).

Florent CORIAT, Anne FLADENMULLER et Luciana ARANTES. « Architecture de collecte pour la géolocalisation en situation de crise :  valuation comparative ». In : ComPAS 2018. 3 juil. 2018. URL : <https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-01877942/document> (visité le 18/10/2018).

Bibliographie

- [1] Alex BAVELAS. « Communication Patterns in Task-Oriented Groups ». In : *Journal of the Acoustical Society of America* 22 (1^{er} nov. 1950), p. 725-730. DOI : 10.1121/1.1906679.
- [2] Linton C. FREEMAN. « Centrality in social networks conceptual clarification ». In : *Social Networks* 1.3 (jan. 1978), p. 215-239. ISSN : 03788733. DOI : 10.1016/0378-8733(78)90021-7. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0378873378900217> (visité le 22/10/2018).
- [3] David B. JOHNSON et David A. MALTZ. « Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks ». In : *Mobile Computing*. Sous la dir. de Tomasz IMIELINSKI et Henry F. KORTH. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science 353. Springer US, 1996, p. 153-181. ISBN : 978-0-7923-9697-0 978-0-585-29603-6. DOI : 10.1007/978-0-585-29603-6_5. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-585-29603-6_5 (visité le 16/02/2016).
- [4] Josh BROCH et al. « A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols ». In : *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 1998, p. 85-97. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=288256> (visité le 16/02/2016).
- [5] Xiaoyan HONG et al. « A group mobility model for ad hoc wireless networks ». In : *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. ACM, 1999, p. 53-60. DOI : 10.1.1.550.4643. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=313248> (visité le 19/07/2016).
- [6] Per JOHANSSON et al. « Scenario-based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks ». In : *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*. 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. MobiCom '99. New York, NY, USA : ACM, 1999, p. 195-206. ISBN : 1-58113-142-9. DOI : 10.1145/313451.313535. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/313451.313535> (visité le 23/05/2014).
- [7] Lawrence PAGE et al. *The PageRank Citation Ranking : Bringing Order to the Web*. 1999.

- [8] P. GUPTA et P.R. KUMAR. « The capacity of wireless networks ». In : *IEEE Transactions on Information Theory* 46.2 (mar. 2000), p. 388-404. ISSN : 0018-9448. DOI : 10.1109/18.825799.
- [9] Brad KARP et H. T. KUNG. « GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks ». In : *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. MobiCom '00. New York, NY, USA : ACM, 2000, p. 243-254. ISBN : 1-58113-197-6. DOI : 10.1145/345910.345953. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/345910.345953> (visité le 23/05/2014).
- [10] Jinyang LI et al. « A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing ». In : *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. MobiCom '00. New York, NY, USA : ACM, 2000, p. 120-130. ISBN : 1-58113-197-6. DOI : 10.1145/345910.345931. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/345910.345931> (visité le 23/05/2014).
- [11] Amin VAHDAT et David BECKER. *Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks*. 2000.
- [12] S. CAPKUN, M. HAMDI et J.- HUBAUX. « GPS-free positioning in mobile ad-hoc networks ». In : *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Jan. 2001, 10 pp.−. DOI : 10.1109/HICSS.2001.927202.
- [13] Andr  s VARGA. « The omnet++ discrete event simulation system ». In : *In ESM'01*. 2001.
- [14] Andreas MEISSNER et al. « Design challenges for an integrated disaster management communication and information system ». In : *The First IEEE Workshop on Disaster Recovery Networks (DIREN 2002)*. T. 24. 2002. URL : <http://www.l3s.de/~risse/pub/P2002-01.pdf> (visité le 01/04/2016).
- [15] Chris SAVARESE, Jan RABAEY et Koen LANGENDOEN. *Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks*. 2002.
- [16] Kevin FALL. « A Delay-tolerant Network Architecture for Challenged Internets ». In : *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*. SIGCOMM '03. New York, NY, USA : ACM, 2003, p. 27-34. ISBN : 978-1-58113-735-4. DOI : 10.1145/863955.863960. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/863955.863960> (visité le 20/10/2015).
- [17] Ananth RAO et al. « Geographic Routing Without Location Information ». In : *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. MobiCom '03. New York, NY, USA : ACM, 2003, p. 96-108. ISBN : 1-58113-753-2. DOI : 10.1145/938985.938996. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/938985.938996> (visité le 22/10/2014).

- [18] B. Bui XUAN, A. FERREIRA et A. JARRY. « Computing shortest, fastest, and foremost journeys in dynamic networks ». In : *International Journal of Foundations of Computer Science* 14.2 (avr. 2003), p. 267-285. ISSN : 0129-0541, 1793-6373. DOI : 10.1142/S0129054103001728. URL : <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0129054103001728> (visité le 22/10/2018).
- [19] Jinsu YOON, Minggang LIU et Brian NOBLE. « Random waypoint considered harmful ». In : *INFOCOM 2003. twenty-second annual joint conference of the IEEE computer and communications. IEEE societies*. T. 2. IEEE, 2003, p. 1312-1321. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1208967 (visité le 16/02/2016).
- [20] Anders LINDGREN, Avri DORIA et Olov SCHELEN. « Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks ». In : *SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review*. 2004, p. 2003.
- [21] *SahanaEden*. 2004. URL : <http://eden.sahanafoundation.org/> (visité le 28/10/2014).
- [22] Emiliano TREVISANI et Andrea VITALETTI. « Cell-id location technique, limits and benefits : An experimental study ». In : *in IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA 2004), Lake District*. 2004.
- [23] Martin EVERETT et Stephen P. BORGATTI. « Ego network betweenness ». In : *Social Networks* 27.1 (jan. 2005), p. 31-38. ISSN : 03788733. DOI : 10.1016/j.socnet.2004.11.007. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037887330400067X> (visité le 22/10/2018).
- [24] Thrasyvoulos SPYROPOULOS, Konstantinos PSOUNIS et Cauligi S. RAGHAVENDRA. « Spray and Wait : An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks ». In : *SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking. WDTN '05*. New York, NY, USA : ACM, 2005, p. 252-259. ISBN : 1-59593-026-4. DOI : 10.1145/1080139.1080143. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1080139.1080143> (visité le 04/06/2014).
- [25] John BURGESS et al. « MaxProp : Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks ». In : *In Proc. IEEE INFOCOM*. 2006.
- [26] *Décret n°2006-106 du 3 février 2006 relatif à l'interopérabilité des réseaux de communication radioélectriques des services publics qui concourent aux missions de sécurité civile*. 3 fév. 2006. (Visité le 21/03/2016).
- [27] Roland FLURY et Roger WATTENHOFER. « MLS : An Efficient Location Service for Mobile Ad Hoc Networks ». In : *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. MobiHoc '06*. New York, NY, USA : ACM, 2006, p. 226-237. ISBN : 1-59593-368-9. DOI : 10.1145/1132905.1132931. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1132905.1132931> (visité le 22/10/2014).

- [28] Wenrui ZHAO et al. « Capacity enhancement using throwboxes in DTNs ». In : *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2006 IEEE International Conference on*. IEEE, 2006, p. 31-40. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4053916 (visité le 26/10/2015).
- [29] Nilanjan BANERJEE, Mark D. CORNER et Brian Neil LEVINE. « An energy-efficient architecture for DTN throwboxes ». In : *INFOCOM 2007. 26th IEEE international conference on computer communications. IEEE*. IEEE, 2007, p. 776-784. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4215678 (visité le 26/10/2015).
- [30] Elizabeth M. DALY et Mads HAAHR. « Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs ». In : *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing - MobiHoc '07*. the 8th ACM international symposium. Montreal, Quebec, Canada : ACM Press, 2007, p. 32. ISBN : 978-1-59593-684-4. DOI : 10.1145/1288107.1288113. URL : <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1288107.1288113> (visité le 22/10/2018).
- [31] Thrasyvoulos SPYROPOULOS, K. PSOUNIS et C.S. RAGHAVENDRA. « Spray and Focus : Efficient Mobility-Assisted Routing for Heterogeneous and Correlated Mobility ». In : *Fifth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*. Mar. 2007, p. 79-85. DOI : 10.1109/PERCOMW.2007.108.
- [32] Peter STAVROULAKIS. *Terrestrial Trunked Radio - TETRA*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN : 978-3-540-71190-2. URL : <http://link.springer.com/10.1007/3-540-71192-9> (visité le 19/07/2016).
- [33] T. GOZE et al. « Secure User-Plane Location (SUPL) Architecture For Assisted GPS (A-GPS) ». In : *2008 4th Advanced Satellite Mobile Systems*. 2008 4th Advanced Satellite Mobile Systems. Août 2008, p. 229-234. DOI : 10.1109/ASMS.2008.46.
- [34] Thomas R. HENDERSON, Mathieu LACAGE et George F. RILEY. « Network simulations with the ns-3 simulator ». In : *In Sigcomm (Demo)*. 2008.
- [35] Ying HUANG et al. « CORPS : Event-driven mobility model for first responders in incident scene ». In : *IEEE Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008*. IEEE Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. Nov. 2008, p. 1-7. DOI : 10.1109/MILCOM.2008.4753143.
- [36] Pan HUI, Jon CROWCROFT et Eiko YONEKI. « BUBBLE Rap : Social-based forwarding in delay tolerant networks ». In : *in Proc. ACM MobiHoc*. 2008.
- [37] Thrasyvoulos SPYROPOULOS, K. PSOUNIS et C.S. RAGHAVENDRA. « Efficient Routing in Intermittently Connected Mobile Networks : The Multiple-Copy Case ». In : *IEEE/ACM Transactions on Networking* 16.1 (fév. 2008), p. 77-90. ISSN : 1063-6692. DOI : 10.1109/TNET.2007.897964.

- [38] Thrasyvoulos SPYROPOULOS, K. PSOUNIS et C.S. RAGHAVENDRA. « Efficient Routing in Intermittently Connected Mobile Networks : The Single-Copy Case ». In : *IEEE/ACM Transactions on Networking* 16.1 (fév. 2008), p. 63-76. ISSN : 1063-6692. DOI : 10.1109/TNET.2007.897962.
- [39] Ari KERÄNEN, Jörg OTT et Teemu KÄRKKÄINEN. « The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation ». In : 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUtools). 2009. URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/similar?doi=10.1.1.380.3371&type=ab> (visité le 23/05/2014).
- [40] M.Y.S. UDDIN et al. « A post-disaster mobility model for Delay Tolerant Networking ». In : *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter*. Déc. 2009, p. 2785-2796. DOI : 10.1109/WSC.2009.5429249.
- [41] Arnaud CASTEIGTS et al. « Time-Varying Graphs and Dynamic Networks ». In : *arXiv :1012.0009 [physics]* (30 nov. 2010). arXiv : 1012.0009. URL : <http://arxiv.org/abs/1012.0009> (visité le 22/10/2018).
- [42] Mathias BOC et al. « Price : Hybrid geographic and co-based forwarding in delay-tolerant networks ». In : *Computer Networks* 55.9 (juin 2011), p. 2352-2360. ISSN : 13891286. DOI : 10.1016/j.comnet.2011.03.014. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128611001174> (visité le 23/05/2014).
- [43] Sergio L. Toral Marín D. G. REINA. « Evaluation of Ad Hoc Networks in Disaster Scenarios. » In : (2011), p. 759-764. DOI : 10.1109/INCoS.2011.86.
- [44] Theus HOSSMANN et al. « Twitter in disaster mode : Opportunistic communication and distribution of sensor data in emergencies ». In : *Proceedings of the 3rd Extreme Conference on Communication : The Amazon Expedition*. ACM, 2011, p. 1. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2414394> (visité le 08/03/2016).
- [45] Abraham MARTÍN-CAMPILLO et al. « Electronic Triage Tag and Opportunistic Networks in Disasters ». In : *Proceedings of the Special Workshop on Internet and Disasters*. SWID '11. New York, NY, USA : ACM, 2011, 6 :1-6 :10. ISBN : 978-1-4503-1044-4. DOI : 10.1145/2079360.2079366. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2079360.2079366> (visité le 16/10/2018).
- [46] Sujoy SAHA et al. « Post Disaster Management Using Delay Tolerant Network ». In : *Recent Trends in Wireless and Mobile Networks*. Sous la dir. d'Abdulkadir ÖZCAN, Jan ZIZKA et Dhinakaran NAGAMALAI. Communications in Computer and Information Science 162. Springer Berlin Heidelberg, 1^{er} jan. 2011, p. 170-184. ISBN : 978-3-642-21936-8 978-3-642-21937-5. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-21937-5_16 (visité le 23/05/2014).
- [47] Arifumi UTANI, Teruhiro MIZUMOTO et Takashi OKUMURA. « How Geeks Responded to a Catastrophic Disaster of a High-tech Country : Rapid Development of Counter-disaster Systems for the Great East Japan Earthquake of March 2011 ». In : *Proceedings of the Special Workshop on Internet and Disasters*. Special Workshop on Internet and Disasters. SWID '11. New York, NY, USA : ACM,

- 2011, 9 :1-9 :8. ISBN : 978-1-4503-1044-4. DOI : 10.1145/2079360.2079369. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2079360.2079369> (visité le 28/10/2014).
- [48] Jonas WILLAREDT. « WiFi and Cell-ID based positioning- Protocols, Standards and Solutions ». In : SNET Project WT. 2011.
- [49] Miguel A. WISTER et al. « Performance Evaluation of AODV and DYMO As a Plattform for Rescue Task Applications in MANETs ». In : *Proceedings of the 2011 IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. WAINA '11. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2011, p. 670-675. ISBN : 978-0-7695-4338-3. DOI : 10.1109/WAINA.2011.46. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/WAINA.2011.46> (visité le 23/05/2014).
- [50] DON TUTE. *Can Public-Safety Radio's P25 Survive LTE?* Electronic Design. 17 juil. 2012. URL : <http://electronicdesign.com/analog/can-public-safety-radio-s-p25-survive-lte> (visité le 20/07/2016).
- [51] Petter HOLME et Jari SARAMÄKI. « Temporal networks ». In : *Physics Reports*. Temporal Networks 519.3 (oct. 2012), p. 97-125. ISSN : 0370-1573. DOI : 10.1016/j.physrep.2012.03.001. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157312000841> (visité le 06/01/2015).
- [52] Hyounghshick KIM et Ross ANDERSON. « Temporal node centrality in complex networks ». In : *Physical Review E* 85.2 (13 fév. 2012). ISSN : 1539-3755, 1550-2376. DOI : 10.1103/PhysRevE.85.026107. URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.85.026107> (visité le 23/10/2018).
- [53] Glenn PEARSON et al. « The Role of Location for Family Reunification During Disasters ». In : *Proceedings of the First ACM SIGSPATIAL International Workshop on Use of GIS in Public Health*. HealthGIS '12. New York, NY, USA : ACM, 2012, p. 11-18. ISBN : 978-1-4503-1703-0. DOI : 10.1145/2452516.2452519. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2452516.2452519> (visité le 27/10/2014).
- [54] Luís CONCEIÇÃO et Marilia CURADO. « Modelling Mobility Based on Human Behaviour in Disaster Areas ». In : *Wired/Wireless Internet Communication*. Sous la dir. de Vassilis TSAOUSSIDIS et al. Lecture Notes in Computer Science 7889. Springer Berlin Heidelberg, 5 juin 2013, p. 56-69. ISBN : 978-3-642-38400-4 978-3-642-38401-1. DOI : 10.1007/978-3-642-38401-1_5. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-38401-1_5 (visité le 22/02/2016).
- [55] A. DEMENTYEV et al. « Power consumption analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT sensor nodes in a cyclic sleep scenario ». In : *Wireless Symposium (IWS), 2013 IEEE International*. Wireless Symposium (IWS), 2013 IEEE International. Avr. 2013, p. 1-4. DOI : 10.1109/IEEE-IWS.2013.6616827.

- [56] Abraham MARTÍN-CAMPILLO et al. « Evaluating opportunistic networks in disaster scenarios ». In : *Journal of Network and Computer Applications* 36.2 (mar. 2013), p. 870-880. ISSN : 1084-8045. DOI : 10.1016/j.jnca.2012.11.001. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804512002275> (visité le 20/10/2015).
- [57] C. RAFFELSBERGER et H. HELLWAGNER. « A hybrid MANET-DTN routing scheme for emergency response scenarios ». In : 2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. Mar. 2013, p. 505-510. DOI : 10.1109/PerComW.2013.6529549.
- [58] Stan RATLIFF, John DOWDELL et Charles PERKINS. *Dynamic MANET On-demand (AODVv2) Routing*. 25 fév. 2013. URL : <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-dymo-26> (visité le 03/06/2014).
- [59] D. G. REINA et al. « Multi-objective performance optimization of a probabilistic similarity/dissimilarity-based broadcasting scheme for mobile ad hoc networks in disaster response scenarios ». In : *Soft Computing* 18.9 (21 déc. 2013), p. 1745-1756. ISSN : 1432-7643, 1433-7479. DOI : 10.1007/s00500-013-1207-3. URL : <http://link.springer.com/accesdistant.upmc.fr/article/10.1007/s00500-013-1207-3> (visité le 20/10/2015).
- [60] Jipeng ZHOU et al. « Predictive and Fault-Tolerant Location Service in Mobile Ad Hoc Networks ». In : *Wireless Personal Communications* 71.4 (1^{er} août 2013), p. 3115-3130. ISSN : 0929-6212, 1572-834X. DOI : 10.1007/s11277-013-0994-2. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-013-0994-2> (visité le 29/08/2017).
- [61] Pierre ALONSO. « Thaïlande, Taïwan : les réseaux Mesh, outil anticensure ». In : *Le Monde.fr* (23 mai 2014). ISSN : 1950-6244. URL : http://www.lemonde.fr/pixels/article/2014/05/23/thaïlande-taiwan-les-reseaux-mesh-outil-anticensure_4420312_4408996.html (visité le 23/03/2016).
- [62] Suman BHATTACHARJEE, Siuli ROY et Somprakash BANDYOPADHYAY. « Exploring an energy-efficient DTN framework supporting disaster management services in post disaster relief operation ». In : *Wireless Networks* 21.3 (22 oct. 2014), p. 1033-1046. ISSN : 1022-0038, 1572-8196. DOI : 10.1007/s11276-014-0836-5. URL : <http://link.springer.com/article/10.1007/s11276-014-0836-5> (visité le 20/10/2015).
- [63] Florent CORIAT et al. « Towards distributed geolocation for large scale disaster management ». In : WSDP - Chilean Workshop on Distributed and Parallel Systems. Talca, Chile, nov. 2014. URL : <http://hal.upmc.fr/hal-01104657> (visité le 13/02/2015).
- [64] Yves EUDES. « Firechat, l'application popularisée par les manifestants hongkongais ». In : *Le Monde.fr* (3 oct. 2014). ISSN : 1950-6244. URL : <http://www.lemonde.fr/pixels/article/2014/10/03/firechat-1-application->

- popularisee-par-les-manifestants-hongkongais_4500216_4408996.html (visité le 23/03/2016).
- [65] Josh HORWITZ. *Unblockable ? Unstoppable ? FireChat messaging app unites China and Taiwan in free speech... and it's not pretty*. Tech in Asia. 31 mar. 2014. URL : <https://www.techinasia.com/unblockable-unstoppable-firechat-messaging-app-unites-china-and-taiwan-in-free-speech-and-its-not-pretty> (visité le 23/03/2016).
 - [66] Liliana Enciso QUISPE et Luis Mengual GALAN. « Behavior of Ad Hoc routing protocols, analyzed for emergency and rescue scenarios, on a real urban area ». In : *Expert Systems with Applications* 41.5 (avr. 2014), p. 2565-2573. ISSN : 0957-4174. DOI : 10.1016/j.eswa.2013.10.004. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417413008099> (visité le 20/10/2015).
 - [67] Christian REUTER, Thomas LUDWIG et Volkmar PIPEK. « Ad Hoc Participation in Situation Assessment : Supporting Mobile Collaboration in Emergencies ». In : *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 21.5 (nov. 2014), 26 :1-26 :26. ISSN : 1073-0516. DOI : 10.1145/2651365. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2651365> (visité le 15/01/2015).
 - [68] Anand BHOJAN et Guo Wei TAN. « Mumble : Framework for Seamless Message Transfer on Smartphones ». In : *Proceedings of the 1st International Workshop on Experiences with the Design and Implementation of Smart Objects*. SmartObjects '15. New York, NY, USA : ACM, 2015, p. 43-48. ISBN : 978-1-4503-3535-5. DOI : 10.1145/2797044.2797048. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2797044.2797048> (visité le 06/11/2015).
 - [69] S. GANGULY et al. « A location based mobility prediction scheme for post disaster communication network using DTN ». In : *Applications and Innovations in Mobile Computing (AIMoC), 2015*. Applications and Innovations in Mobile Computing (AIMoC), 2015. Fév. 2015, p. 25-28. DOI : 10.1109/AIMOC.2015.7083825.
 - [70] Yue LIU et al. « Performance and Energy Consumption Analysis of a Delay-Tolerant Network for Censorship-Resistant Communication ». In : ACM Press, 2015, p. 257-266. ISBN : 978-1-4503-3489-1. DOI : 10.1145/2746285.2746320. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2746285.2746320> (visité le 20/10/2015).
 - [71] Naércio MAGAIA et al. « Betweenness centrality in Delay Tolerant Networks : A survey ». In : *Ad Hoc Networks* 33 (oct. 2015), p. 284-305. ISSN : 15708705. DOI : 10.1016/j.adhoc.2015.05.002. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S157087051500092X> (visité le 22/10/2018).
 - [72] Daniel MORENO, Sergio F. OCHOA et Roc MESEGUER. « A Context-Aware Model to Provide Positioning in Disaster Relief Scenarios ». In : *Sensors (Basel, Switzerland)* 15.10 (30 sept. 2015), p. 25176-25207. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s151025176. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4634398/> (visité le 12/10/2018).

- [73] D. G. REINA et al. « A Survey on Multihop Ad Hoc Networks for Disaster Response Scenarios ». In : *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2015, 2015 (4 oct. 2015), e647037. ISSN : 1550-1329, 1550-1329. DOI : 10.1155/2015/647037, 10.1155/2015/647037. URL : <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2015/647037/abs/>, %20<http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2015/647037/abs/> (visité le 20/10/2015).
- [74] Florent CORIAT et al. « Crowdsourcing-based architecture for post-disaster geolocation : A comparative performance evaluation ». In : *2016 IEEE 15th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*. The 15th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA 2016). Cambridge, Boston, MA, USA, 31 oct. 2016, p. 1-9. DOI : 10.1109/NCA.2016.7778583. URL : <http://hal.upmc.fr/hal-01416297/document> (visité le 28/03/2017).
- [75] CROIX-ROUGE FRANÇAISE. *L'appli qui sauve 2.0*. Croix-Rouge française. 5 juil. 2016. URL : <https://www.croix-rouge.fr/Actualite/L-appli-qui-sauve-2.0-2002> (visité le 10/10/2018).
- [76] Min-Joong LEE, Sunghye CHOI et Chin-Wan CHUNG. « Efficient algorithms for updating betweenness centrality in fully dynamic graphs ». In : *Information Sciences* 326 (1^{er} jan. 2016), p. 278-296. ISSN : 0020-0255. DOI : 10.1016/j.ins.2015.07.053. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025515005617> (visité le 23/10/2018).
- [77] Taro TAKAGUCHI, Yosuke YANO et Yuichi YOSHIDA. « Coverage centralities for temporal networks ». In : *The European Physical Journal B* 89.2 (fév. 2016). ISSN : 1434-6028, 1434-6036. DOI : 10.1140/epjb/e2016-60498-7. URL : <http://link.springer.com/10.1140/epjb/e2016-60498-7> (visité le 23/10/2018).
- [78] Tooska DARGAHI, Sadaf MOMENI et Hosein SHAFIEL. « Post Disaster Resilient Networks : Design Guidelines for Rescue Operations ». In : *International Workshop on Open Problems in Network Security (iNetSec)*. T. IFIP eCollection-1. Mai 2017, p. 10-19. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01684183/document> (visité le 23/10/2018).
- [79] Marwan GHANEM, Florent CORIAT et Lionel TABOURIER. « Ego-betweenness centrality in link streams ». In : *The 7th Workshop on Social Network Analysis in Applications (workshop ASONAM 2017)*. Sydney, Australia, juil. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01550340> (visité le 21/11/2017).
- [80] C. HAFIL et al. « First response — collaborative disaster information gathering platform ». In : *2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. 2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). T. 2. Avr. 2017, p. 390-393. DOI : 10.1109/ICECA.2017.8212841.

- [81] Yuanrong HE, Dejian ZHANG et Yihui FANG. « Development of a mobile post-disaster management system using free and open source technologies ». In : *International Journal of Disaster Risk Reduction* 25 (oct. 2017), p. 101-110. ISSN : 22124209. DOI : 10.1016/j.ijdr.2017.08.007. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212420916307270> (visité le 22/10/2018).
- [82] Amir Rahimzadeh ILKHECHI et al. « PETAL : A fully distributed location service for wireless ad hoc networks ». In : *Journal of Network and Computer Applications* 83 (avr. 2017), p. 1-11. ISSN : 10848045. DOI : 10.1016/j.jnca.2017.01.021. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1084804517300437> (visité le 29/08/2017).
- [83] R. B. R. LOURENÇO et al. « Post-disaster data evacuation from isolated data centers through LEO satellite networks ». In : *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Mai 2017, p. 1-5. DOI : 10.1109/ICC.2017.7996437.
- [84] Farouk MEZGHANI et al. « Alternative Opportunistic Alert Diffusion to Support Infrastructure Failure during Disasters ». In : *Sensors* 17.10 (17 oct. 2017), p. 2370. DOI : 10.3390/s17102370. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2370> (visité le 22/10/2018).
- [85] Malik Muhammad QIRTAS, Yasir FAHEEM et Mubashir Husain REHMANI. « Throw-boxes in delay tolerant networks : A survey of placement strategies, buffering capacity, and mobility models ». In : *Journal of Network and Computer Applications* 91 (Supplement C 1^{er} août 2017), p. 89-103. ISSN : 1084-8045. DOI : 10.1016/j.jnca.2017.04.004. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804517301431> (visité le 28/09/2017).
- [86] Florent CORIAT, Anne FLADENMULLER et Luciana ARANTES. « Architecture de collecte pour la géolocalisation en situation de crise : évaluation comparative ». In : *ComPAS 2018*. 3 juil. 2018. URL : <https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-01877942/document> (visité le 18/10/2018).
- [87] *American Red Cross Mobile Apps*. American Red Cross. URL : <http://www.redcross.org/get-help/prepare-for-emergencies/mobile-apps> (visité le 08/03/2016).
- [88] *CRAWDAD*. A Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth. URL : <https://crawdad.org/>.
- [89] *Disaster Alert Network - ubAlert*. URL : <https://www.ubalert.com/> (visité le 20/06/2014).
- [90] *FireChat*. URL : <http://opengarden.com/> (visité le 22/03/2016).
- [91] *Google Crisis Response*. URL : <https://www.google.org/crisisresponse/about/> (visité le 08/03/2016).

- [92] Mathieu GRUMIAUX. *Android : l'installation d'applications en pair-à-pair débarque en bêta*. Clubic.com. URL : <https://www.clubic.com/os-mobile/android/actualite-846594-sr-ludo-android-installation-apps-pair-pair-beta.html> (visité le 23/10/2018).
- [93] *Loon for All – Project Loon – Google*. URL : <https://www.google.com/loon/> (visité le 08/03/2016).
- [94] *OSM XML - OpenStreetMap Wiki*. URL : http://wiki.openstreetmap.org/wiki/OSM_XML (visité le 12/10/2015).
- [95] OXYGÈNE EDITIONS. *Secours Expo Accueil - Le salon 100 % secours, soins d'urgence et prévention*. Secours Expo. URL : <http://www.secours-expo.com/fr/> (visité le 23/10/2018).
- [96] *Project 25 Technology Interest Group*. URL : <http://www.project25.org> (visité le 27/09/2017).
- [97] *TETRA*. ETSI. URL : <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/tetra> (visité le 27/09/2017).
- [98] *Tetrapol Forum*. URL : <http://www.tetrapol.com/> (visité le 08/03/2016).
- [99] *The Serval Project*. URL : <http://www.servalproject.org/> (visité le 08/03/2016).
- [100] *Ushahidi*. URL : <http://www.ushahidi.com> (visité le 08/03/2016).