Algorithme de routage coopératif à qualité de service pour des réseaux ad hoc agri-environnementaux

Jean-Pierre Chanet

▶ **To cite this version:**

Jean-Pierre Chanet. Algorithme de routage coopératif à qualité de service pour des réseaux ad hoc agri-environnementaux. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2007. Français. NNT : . tel-00343131

HAL Id: tel-00343131
https://theses.hal.science/tel-00343131

Submitted on 29 Nov 2008

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.

N^o d'Ordre : 1745
EDSPIC : 373

Université Blaise Pascal - Clermont II

École Doctorale
Sciences Pour l'Ingénieur de Clermont-Ferrand

Thèse

présentée par

Jean-Pierre CHANET

Ingénieur en Génie Électrique

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITE

Spécialité : INFORMATIQUE

Algorithme de routage coopératif à qualité de service pour des réseaux ad hoc agri-environnementaux

---

Soutenue publiquement le 20 avril 2007 devant le jury :

Monsieur	Alain Quilliot	Président
Monsieur	Ahmed Khoumsi	Rapporteur
Madame	Hong Sun	Rapporteur
Monsieur	Jacques Duchêne	Examinateur
Monsieur	Gilbert Grenier	Examinateur
Monsieur	Frédéric Vigier	Invité
Monsieur	Kun Mean Hou	Directeur de thèse

Cemagref

Université Blaise Pascal

LIMOS

A Myriam,
A mes Parents

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier vivement Madame Hong Sun et Monsieur Ahmed Khoumsi d'avoir accepté d'être rapporteur de mes travaux et Monsieur Alain Quilliot de bien avoir voulu présider mon jury de thèse. Merci également à Messieurs Jacques Duchêne et Gilbert Grenier pour leur participation à ce jury.

Je remercie bien évidemment le professeur Kun-Mean Hou d'avoir encadré cette thèse. Ces années de travail en commun m'ont beaucoup appris scientifiquement et humainement. Je souhaite à tous les doctorants d'avoir un directeur de thèse aussi généreux et aussi enclin à partager son savoir, son travail et son temps. Notre collaboration va bien entendu se poursuivre pour mon plus grand plaisir.

Je remercie également Messieurs Marc Richetin, Michel Schneider et Cédric Adjih d'avoir participé à mon comité de suivi de thèse et d'avoir apporté leur expertise et leurs conseils à l'orientation de ces recherches.

Je tiens aussi à remercier le Cemagref pour sa politique volontariste, qui encourage et donne les moyens à ses permanents pour suivre des formations doctorales.

Les débuts de mes travaux sur les réseaux agri-environnementaux remontent à l'année 2002 et ont été possibles grâce à mon intégration au sein de l'équipe COPAIN du Cemagref. Merci à Frédéric Vigier qui m'a accueilli dans cette équipe et qui a soutenu dès le début mes initiatives autour de ce thème. Il a su contribuer au développement des projets sur cette thématique et a apporté ses nombreuses idées.

Je veux bien évidemment remercier les équipes avec qui j'ai travaillé durant ces années, car sans collectif, rien n'est possible :

- Mes collègues de l'équipe COPAIN pour leur aide et les discussions enrichissantes sur les systèmes d'information et la télégéomatique. Je remercie plus particulièrement Géraldine André et Daniel Boffety qui m'ont fait confiance dès le début en s'investissant pleinement dans ces problématiques de télécommunication. J'espère que nous continuerons à travailler ensemble avec la même envie et la même bonne humeur ;
- Les membres de l'équipe SMIR du LIMOS pour leur accueil, leur aide, leur gentillesse et pour les moments que nous avons partagés. Sans eux, le développement de ce thème de recherche n'aurait pas été possible et sans eux, il ne pourrait se poursuivre. Je suis donc très reconnaissant envers Aziz Amamra, Gil De Sousa, Christophe de Vaulx, Aurélien Jacquot, Jian Jin Li, Messaoud Kara et plus particulièrement envers Hai-Ying Zhou qui m'a rejoint au Cemagref pour son post doctorat et à qui j'adresse tous mes voeux de réussite pour sa nouvelle carrière ;
- Thierry Humbert et Philippe Rameau pour notre collaboration fructueuse durant ces années, prouvant que le travail inter-équipe et inter-TR est possible et qui, j'en suis sûr, se poursuivra dans d'aussi bonnes conditions. J'associe également à ces

remerciements Guy Brenon et Henri Chérasse pour leur contribution à la réalisation des antennes.

Je suis également reconnaissant envers Christiane Albaret pour son précieux appui dans le suivi financier des projets et pour sa relecture attentive de ce manuscrit. Je remercie aussi Christine Alain, Eliane Simon et Philippe Antoine pour avoir su assurer avec efficacité et persévérance les questions de logistiques autour de mes activités.

Je tiens également à associer à ces remerciement les étudiants qui m'ont accompagné au cours de cette thèse et j'espère que nos échanges auront été aussi enrichissants pour eux, qu'ils l'ont été pour moi : merci donc à Landry Kodia, Mathieu Chaput, Gaëtan Marion, Florent Maerten et Mathieu Bruneau.

Je profite également de ce moment privilégié pour remercier Michel Berducat, Pascal Eynard, Michel Mas et Cyril Tinet. Ce sont des personnes qui ont compté dans mon parcours et qui ont contribué à me construire professionnellement.

Merci aussi à Roland, aux Christophes, à Nicolas, à Hélène pour les discussions enrichissantes que nous avons eues et à tous ceux, habitués ou occasionnels des pauses café, pour les bons moments partagés.

Merci enfin à Myriam pour sa présence et son soutien indéfectible même dans les moments difficiles.

⋆⋆⋆⋆⋆⋆⋆

Résumé

Avoir une agriculture garantissant ses bonnes pratiques et ainsi, contribuer à la protection de l'environnement est un enjeu majeur du développement durable du monde rural. Pour cela, il faut être à même de surveiller les milieux et d'enregistrer les interventions liées à l'agriculture. Cette surveillance nécessite de collecter de plus en plus de données spatio-temporelles pour alimenter des systèmes d'information agri-environnementaux capables de construire des indicateurs permettant de prendre des décisions, d'assurer des contrôles...

Cette collecte de données ne peut être performante que si elle est réalisée de manière automatique au travers de réseaux informatiques. Ainsi, dans le cadre de ces travaux, le concept de réseaux agri-environnementaux est présenté. Les caractéristiques et les contraintes liées à ces réseaux montrent que seuls les réseaux sans fil de type ad hoc peuvent être mis en oeuvre pour répondre aux besoins. Un état de l'art des réseaux ad hoc et des protocoles de routages associés montre que la création d'un nouveau protocole de routage coopératif est nécessaire afin de satisfaire les besoins des réseaux agri-environnementaux. Ce protocole de routage coopératif est la principale contribution de ces travaux.

Vient ensuite la question de Qualité de Service dans ce type de réseaux sans fil qui est très importante, notamment dans un contexte de surveillance de l'environnement. Au sein du protocole de routage proposé, la Qualité de Service est abordée suivant plusieurs principes : estimation de la bande passante, augmentation de la connectivité du réseau... La Qualité de Service dans les réseaux agri-environnementaux est donc un autre point important de ces travaux de thèse.

La mise en oeuvre de ces principes est illustrée au travers de différents exemples de réseaux agri-environnementaux. Cet aspect est abordé de manière globale par la mise en oeuvre de modules originaux tant sur le plan matériel que logiciel. Les solutions proposées permettent le déploiement de capteurs, fixes ou mobiles, à même de surveiller l'environnement et ainsi, de mieux comprendre les actions de l'homme sur celui-ci.

Mots-clés : Réseaux sans Fil Ad Hoc, Protocole de Routage, Qualité de Service, Antenne, Communication, Réseaux Agri-environnementaux

Abstract

To have an agriculture guaranteeing its good practices and thus, contributing to the environmental protection is a major issue of the sustainable development of rural areas. For that, it is necessary to be able to supervise the environment and to record the agricultural interventions. This monitoring requires to collect space-time data to supply the agri-environmental information systems enable to build indicators allowing to take decisions, to provide controls...

Data acquisition can be effective only if it is carried out in an automatic way through communication networks. Thus, within the framework of this work, the concept of agri-environmental networks is presented. The characteristics and the constraints related to these kind of networks show that only the ad hoc wireless networks can be implemented to meet the needs. A state of the art of the ad hoc networks and the associated routings protocols shows that the creation of a new cooperative routing protocol is necessary in order to satisfy the agri-environmental network needs. This cooperative routing protocol is the principal contribution of this work.

Then, the question of the Quality of Service in this kind of wireless networks is very important, in particular in a context of environment monitoring. Within the routing protocol suggested, the Quality of Service is approached according to several principles : estimate of the available bandwidth, improve of the network connectivity... The Quality of Service in the agri-environmental networks is thus another important point of this thesis work.

The implementation of these principles is illustrated through various examples of agri-environmental networks. This aspect is approached on the whole by the implementation of original modules as well on the hardware level as software. The proposed solutions allow to deploy fixed or mobile sensors, able to supervise the environment and thus, to understand better the man's intervention.

Keywords: Wireless Ad Hoc Network, Routing Protocol, Quality of Service, Antenna, Communication, Agri-environmental Network

Table des matières

Table des figures **xiii**

Liste des tableaux **xvii**

Liste des acronymes **xix**

Introduction **1**

1 Des réseaux agri-environnementaux **5**

1.1 Pourquoi des réseaux agri-environnementaux ? 6

1.2 Les caractéristiques des réseaux agri-environnementaux 12

1.2.1 Des réseaux hétérogènes 12

1.2.2 Des spécificités spatiales 13

1.2.3 Des contraintes de mise en oeuvre 14

1.3 Synthèse 15

2 Les réseaux sans fil ad hoc : état de l'art **17**

2.1 Les réseaux sans fil 18

2.1.1 Les différents standards 18

2.1.2 La mise en oeuvre des réseaux sans fil 25

2.1.3 Synthèse 26

2.2 Les protocoles de routage ad hoc 28

2.2.1 Le principe du routage dans les réseaux ad hoc 28

2.2.2 Les protocoles de routage proactifs 29

2.2.3 Les protocoles de routage réactifs 32

2.2.4 Les protocoles de routage hybrides 35

2.2.5 Les protocoles de routage géographiques 38

2.2.6 Synthèse 42
2.3 Le routage dans les réseaux agri-environnementaux 45
2.3.1 Un comparatif des protocoles existants 45
2.3.2 La nécessité d'un nouveau protocole 46

3 Un nouveau protocole pour de nouveaux réseaux 49
3.1 Le protocole de Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative (CIVIC) 50
3.2 La description détaillée de CIVIC 56
3.2.1 Le format des paquets dans CIVIC 57
3.2.2 Le fonctionnement de CIVIC 61
3.2.3 La structure de la pile CIVIC 66
3.3 L'intégration de CIVIC : embedded-CIVIC 67
3.3.1 Le concept d'architecture multicomposants 67
3.3.2 Le micro noyau temps réel LIMOS 69
3.3.3 La structure d'e-CIVIC 71

4 La Qualité de Service dans CIVIC 75
4.1 La Qualité de Service dans les réseaux ad hoc 76
4.1.1 La Qualité de Service à différentes échelles 76
4.1.2 La détermination des paramètres de Qualité de Service dans les réseaux ad hoc 80
4.1.3 Synthèse 82
4.2 Le principe de la Qualité de Service dans CIVIC 83
4.2.1 Le multisupport 83
4.2.2 L'utilisation d'antennes directives 84
4.2.3 L'estimation de la bande passante 86
4.2.4 Le contexte du réseau 87
4.3 L'estimation de la bande passante 88
4.3.1 La mesure et le filtrage des RTT 88
4.3.2 L'estimateur de bande passante 90
4.3.3 Les performances de l'estimateur NIMBE 91
4.3.4 La mise en oeuvre de l'estimateur NIMBE 96

5 Antennes directives et modules embedded-CIVIC : premières réalisations **99**

5.1 Des antennes directives pour améliorer la connectivité des noeuds 100

5.1.1 Le principe des antennes directives asservies 100

5.1.2 L'asservissement des antennes 106

5.1.3 La validation des antennes directives asservies 110

5.2 La validation du concept de réseau agri-environnemental et d'architecture multicomposants 113

5.2.1 Des réseaux sans fil pour une agriculture raisonnée 113

5.2.2 Un réseau sans fil pour l'aide aux personnes et la protection de l'environnement 115

5.2.3 Des modules e-CIVIC pour mesurer l'humidité des sols 118

Conclusion et perspectives **121**

Bibliographie **125**

Table des figures

1.1 Un exemple de capteurs sur une parcelle agricole expérimentale (Cemagref/J. M. Le-Bars) . . . 11
1.2 L'architecture en clusters des réseaux agri-environnementaux . . . 13

2.1 La portée et le débit des différents standards de communication sans fil [Pujolle 03] . . . 19
2.2 La position du standard IEEE 802.11 dans le modèle OSI, d'après [ISO 94] 22
2.3 Le problème des stations cachées avec le CSMA/CA . . . 23
2.4 Les bandes passantes théoriques et réelles des différents standards de Wireless Local Area Network (WLAN) d'après [Pujolle 03] . . . 24
2.5 Un exemple de Scatternet composé de trois Piconet . . . 25
2.6 Le principe du routage dans les réseaux ad hoc . . . 28
2.7 Le principe des noeuds MPR . . . 30
2.8 Le principe de l'arborescence dans le protocole TBRPF d'après [Ogier 00] . 31
2.9 Un exemple de réseau utilisant le protocole DSDV d'après [Perkins 01b] . . 32
2.10 Le principe des zones en fonction du nombre de sauts dans le protocole FSR d'après [Pei 00] . . . 33
2.11 Le principe de découverte de route dans le protocole DSR . . . 34
2.12 Les différents types de liens dans le protocole Associativity-Based Routing (ABR) . . . 35
2.13 Le principe des zones dans le protocole ZRP . . . 36
2.14 Les différents types de noeuds dans le protocole CBRP . . . 37
2.15 Le modèle énergétique utilisé par le protocole Energy Aware Dynamic Source Routing (EADSR) [Scriptor 99] . . . 38
2.16 Le principe de recherche de route dans le protocole DREAM . . . 39
2.17 Le principe de recherche de route dans le protocole LAR1 . . . 40
2.18 Le principe de recherche de route dans le protocole LAR2 . . . 40
2.19 Le principe de recherche de route dans le protocole GPSR . . . 41
2.20 Les protocoles de routage ad hoc . . . 42

3.1 Les principales caractéristiques du protocole de routage Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative (CIVIC) . . . 51
3.2 Le principe des noeuds FFCCC . . . 55

3.3 Adaptation de l'angle α pour le Directional Area Neighbour Knowledge Adaptive Broadcast (DANKAB) 62
3.4 La structure du protocole de routage CIVIC 66
3.5 Un objet communicant sans fil basé sur un ensemble de composants 68
3.6 Un capteur sans fil basé sur un ensemble d'objets communicants 68
3.7 L'architecture de LIMOS 70
3.8 Le schéma bloc d'un composant de base de embedded-CIVIC (e-CIVIC) . . 72
3.9 Le principe d'un noeud e-CIVIC multisupport et tolérant aux pannes . . . 72
3.10 Un module e-CIVIC avec deux composants 73

4.1 Les différents niveaux d'approche de la QoS dans les réseaux ad hoc 77
4.2 La définition du RTT 81
4.3 Différence de portée entre antenne omnidirectionnelle et directive 84
4.4 Réseau de véhicules équipés d'antennes directives [Ramanathan 05] 85
4.5 Un exemple de mesure de RTT 89
4.6 Les résultats de NIMBE 91
4.7 Le protocole de validation de NIMBE 92
4.8 Les résultats de NIMBE pour des flux UDP connus 92
4.9 L'interface utilisateur du client pour la mesure des RTT 93
4.10 L'influence du nombre de sauts sur la bande passante disponible 94
4.11 L'estimation de la bande passante dans un réseau ad hoc 95
4.12 Le principe de mise en oeuvre de NIMBE 96
4.13 Les différents états de l'automate de gestion des émissions 97

5.1 L'antenne directionnelle SMC DI105 101
5.2 Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive 102
5.3 Modélisation 3D du diagramme de rayonnement de l'antenne directionnelle 103
5.4 Simulation d'un récepteur passant devant un émetteur 103
5.5 Validation des modèles d'antenne 104
5.6 Le modèle CAO de l'antenne de l'infrastructure 105
5.7 Le modèle CAO de l'antenne directive mobile 106
5.8 Les différents repères définis pour le calcul des angles 107
5.9 Les consignes angulaires de l'antenne du mobile 109
5.10 Le schéma de l'asservissement de l'antenne mobile 110
5.11 La réalisation des deux antennes asservies 110
5.12 L'antenne directive mobile 111
5.13 Expérimentation avec des véhicules en convoi 112
5.14 Un pivot d'irrigation automatisé comme noeud d'un réseau ad hoc 114
5.15 Un exemple de relais autonome pouvant servir de Multisupport, Multiservice Router and Server (MMRS) 115
5.16 Le schéma de principe du système MobiPlus [Zhou 06a] 116
5.17 Le module quai à deux composants du projet MobiPlus 117
5.18 Exemple de cartographie réalisée dans le cadre de EnviroBus 118

5.19 Capteur sans fil pour la mesure d'humidité 119

Liste des tableaux

1.1 Les spécificités des réseaux agri-environnementaux 15

2.1 Les caractéristiques des technologies Wi-Fi, Bluetooth et ZigBee 27
2.2 Un exemple de table de routage d'un noeud de réseau DSDV d'après [Perkins 01b] 32
2.3 Les avantages et inconvénients des différentes catégories de protocoles de routage 44

5.1 La portée de l'antenne en fonction de l'écart angulaire par rapport à son axe directeur (données constructeur) 101

Liste des acronymes

"Chaque science, chaque étude a son jargon inintelligible, qui semble n'être inventé que pour en défendre les approches."
Voltaire, *Essais de poésie épique (Chapitre I)*

ABR	Associativity-Based Routing
AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector routing
BPP	Basic Printing Profile
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BRP	Border Resolution Protocol
BRT	Back Routing Table
CBRP	Cluster Based Routing Protocol
CEDAR	Core Extraction Distributed Ad hoc Routing
CIVIC	Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTP	Cordless Telephony Profile
CTS	Clear To Send
DANKAB	Directional Area Neighbour Knowledge Adaptive Broadcast
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	DCF Inter-Frame Spacing
DREAM	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility
DSDV	Dynamic destination-Sequenced Distance-Vector
DSR	Dynamic Routing Source
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EADSR	Energy Aware Dynamic Source Routing
e-CIVIC	embedded-CIVIC
EWMA	Exponentially Weighted Moving Average
FFCCC	Fairly Full Confidence Cooperative and Competitive
FRT	Front Routing Table
FSR	Fisheye State Routing
FTP	File Transfert Protocol
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GSM	Global System for Mobile communication

GSR	Global State Routing
HFC	Hybrid Function Coordination
HIPERLAN	HIgh PErformance Radio Local Area Network
http	HyperText Transfer Protocol
IARP	IntrAzone Routing Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IERP	IntErzone Routing Protocol
IETF	Internet Engineering Task Force
LAR	Location-Aided Routing
LIMOS	LIghtweight Multi-threading Operating System
LSR	Link State Routing
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad hoc NETwork
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMRS	Multisupport, Multiservice Router and Server
MPR	Multi Point Relay
NIMBE	Non Invasive MANET Bandwidth Estimator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLSR	Optimized Link State Routing
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OS	Operating System
OSI	Open System Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
OTT	One-way Trip Time
PCF	Polling Coordination Function
PDA	Personal Digital Assistant
PDR	Packet Delivery Ratio
QOLSR	QoS in ad hoc networks using OLSR
QoS	Qualité de Service
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
RFID	Radio Frequency IDentification
RREP	Route REPly
RREQ	Route REQuest
RT	Routing Table
RTS	Ready To Send
RTT	Round-Trip Time
SI	Système d'Information
SIFS	Short InterFrame Space
SIG	Système d'Information Géographique
SNMP	Simple Network Management Protocol
SPP	Serial Port Profile
TBRPF	Topology Broadcast based on Reverse Path Forwarding
TC	Topology Control
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UDP	User Datagramme Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitain Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Networks
WWAN	Wireless Wide Area Network
ZRP	Zone Routing Protocol

Introduction

"Ciel, que lui vais-je dire et par où commencer ? "
Racine, *Phèdre (Acte I Scène 3)*

De nos jours, l'agriculture a beaucoup évolué. Suite à différentes crises sanitaires (Encéphalopathie Spongiforme Bovine (ESB), grippe aviaire...), les agriculteurs se doivent d'assurer une parfaite traçabilité de leurs produits [Cuny 98, Falconnet 01]. De plus, les contraintes environnementales sont de plus en plus fortes de la part des citoyens et des législateurs.

Ces dernières années ont donc vu apparaître le concept d'*agriculture raisonnée* qui s'est traduit sous forme réglementaire [MAP 02]. L'agriculture raisonnée a pour but d'engager des démarches de gestion des exploitations agricoles qui tendent à renforcer les impacts positifs des pratiques agricoles sur l'environnement et à en réduire les effets négatifs dans le respect des réglementations et en garantissant la rentabilité économique des exploitations. Ce concept impose aux agriculteurs d'assurer la traçabilité de leurs pratiques (enregistrement des apports, des traitements...) afin de garantir son engagement dans cette démarche. Cette traçabilité vient donc s'ajouter à celle des produits qui elle est le plus souvent réglementaire.

Cette nécessité d'enregistrer toutes les activités des exploitations agricoles de manière automatique est le point de départ de ces travaux de thèse. Mais le domaine d'étude s'est rapidement étendu plus globalement à l'environnement.

En effet, l'homme prend peu à peu conscience du fait que la question de préservation de l'environnement est une dimension à part entière du développement économique, d'où l'apparition de la notion de *développement durable* [Brundland 87] :

> *"Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations à venir, de pouvoir répondre à leurs propres besoins".*

Il faut donc être capable d'observer les changements de l'environnement afin de comprendre son évolution et de garantir sa pérénité. De plus, la nature pouvant être hostile

pour l'homme (inondation, glissement de terrain, volcan...) et la société voulant prévenir au maximum les risques, il faut observer le plus finement possible les variations, même rapides, de l'environnement et des milieux.

Tout comme dans le cas de l'agriculture, il faut donc collecter, stocker de nombreuses données en lien avec l'environnement. Pour fédérer toutes les sources d'information et réaliser une collecte automatique, il convient de mettre en oeuvre des réseaux informatiques adaptés à ce contexte : les ***réseaux agri-environnementaux***. Cette notion de réseaux agri-environnementaux est exposée et explicitée dans le chapitre 1 de ce manuscrit.

Les solutions technologiques permettant de déployer un réseau dans le contexte de sources de données agri-environnementales réparties sont principalement les technologies sans fil [Charvat 01]. En effet, il semble difficile d'utiliser des réseaux filaires à cause de la dispersion géographique des sources. Mais ces techniques de communication sont nombreuses : les réseaux de téléphonie mobile [Tabbane 97], les réseaux sans fil basés sur les technologies radio de type IEEE[1] 802.11x, Bluetooth ou autre [Mühlethaler 02]. Le deuxième chapitre présente ces différentes techniques, ainsi que leur mise en oeuvre qui peut être de différentes natures : centralisée ou répartie (ad hoc). Le fonctionnement de ces réseaux s'appuie sur des protocoles de routage chargés d'acheminer l'information entre la source et la destination. Le principe de ces protocoles est également présenté dans ce chapitre 2.

Cette analyse de l'état de l'art de ces technologies montre que leur mise en oeuvre dans le cadre des réseaux agri-environnementaux n'est pas immédiate. Il convient d'avoir une approche globale de la problématique de communication dans ces réseaux : il faut considérer les aspects matériels et logiciels en étroite relation afin de bien répondre aux contraintes exposées dans le premier chapitre.

Afin de répondre au mieux aux besoins des réseaux agri-environnementaux, un nouvel algorithme de routage original a été développé : ***le protocole de Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative (CIVIC)***. Cet algorithme destiné initialement pour la communication entre véhicules en milieu naturel ou sur route, s'est avéré généralisable au cas des réseaux agri-environnementaux car le protocole a un mode de fonctionnement mixte : ad hoc et infrastructure. Il est capable d'intégrer des noeuds mobiles et des noeuds fixes du moment que leur position est connue. Ce protocole de routage s'est montré particulièrement bien adapté aux réseaux agri-environnementaux. Le chapitre 3 du mémoire présente de façon détaillée ce protocole ainsi que son intégration matérielle qui a été prise en compte dès le début de la définition de l'algorithme.

Pour bien répondre aux besoins des réseaux agri-environnementaux, il convient d'avoir un support de la Qualité de Service (QoS) intégré au protocole de communication. La QoS peut être définie comme "*l'effet collectif des performances du service déterminant le degré*

[1] Institute of Electrical and Electronics Engineers

de satisfaction d'un utilisateur de ce service" [Minet 06]. Après un état de l'art de la QoS dans les réseaux sans fil, le Chapitre 4 de ce manuscrit présente les solutions originales proposées au niveau de CIVIC pour satisfaire ce besoin de QoS par la mise en oeuvre notamment, d'un estimateur de bande passante disponible sur le réseau.

La connectivité des noeuds au sein des réseaux agri-environnementaux peut également être problématique et nuire à la QoS. Les noeuds du réseau peuvent être relativement éloignés et il faut pouvoir établir les connexions malgré ces problèmes de distance. Le dernier chapitre présente les solutions proposées pour augmenter la portée des noeuds via l'utilisation d'antenne directives asservies. Les mises en oeuvre de réseaux agri-environnementaux réalisées dans différents projets sont également exposées dans ce chapitre.

⋆⋆⋆⋆⋆⋆⋆

Chapitre 1

Des réseaux agri-environnementaux

"Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question."
Gaston Bachelard, *La formation de l'esprit scientifique*

Sommaire

1.1 Pourquoi des réseaux agri-environnementaux ? 6
1.2 Les caractéristiques des réseaux agri-environnementaux . . . 12
1.2.1 Des réseaux hétérogènes 12
1.2.2 Des spécificités spatiales 13
1.2.3 Des contraintes de mise en oeuvre 14
1.3 Synthèse 15

Le concept de réseaux agri-environnementaux repose sur le principe de mélange de différentes sources de données chargées d'enregistrer les activités agricoles, de s'assurer que les pratiques des agriculteurs préservent l'environnement et également de surveiller l'évolution des milieux naturels. Ces différentes tâches accomplies au sein de ces réseaux leur confèrent un caractère particulier.

Après avoir défini les réseaux agri-environnementaux, le chapitre présente leurs caractéristiques afin de pouvoir trouver des solutions technologiques à même de répondre à leurs besoins.

1.1 Pourquoi des réseaux agri-environnementaux ?

L'agriculture a beaucoup évolué depuis une vingtaine d'années. Différentes crises sanitaires, telles que celle de l'ESB, ont fait prendre conscience aux différentes filières alimentaires, sous la pression notamment des consommateurs, de l'importance de la traçabilité des produits [Cuny 98, Falconnet 01]. La traçabilité s'est peu à peu étendue à toute l'activité agricole et ne concerne plus uniquement les produits, mais également les pratiques comme par exemple les apports d'intrants, l'utilisation de la ressource en eau... La politique agricole commune s'est d'ailleurs orientée vers une agriculture raisonnée préservant l'environnement, en attribuant les aides communautaires aux acteurs des filières respectant des contraintes environnementales pour leurs pratiques [Oost 06, Roche 06].

La traçabilité nécessite l'enregistrement de nombreuses informations qui doivent être collectées et archivées afin de garder un historique des activités. Le volume de données peut devenir très important et l'utilisation d'un Système d'Information (SI) devient très vite nécessaire. Le développement des SI dans les filières agricoles oblige les agriculteurs à recueillir et à fournir de plus en plus d'informations à de nombreux partenaires [Serodio 01]. Afin de limiter et de fiabiliser le travail de saisie, et d'avoir un flux d'informations en phase avec celui des produits, il semble pertinent de mettre en place une acquisition en temps réel des données au niveau de l'exploitation agricole comme cela est fait dans les entreprises agroalimentaires plus en aval des filières agricoles. De plus, cette collecte automatique en temps réel des informations permet de garantir une traçabilité plus fiable des produits et des pratiques.

La collecte des informations au niveau d'une exploitation agricole présente de nombreuses particularités :

- les sources de données au niveau de l'exploitation sont nombreuses et très hétérogènes [Martin 02],
- les données ont une dimension spatiale [Berducat 00],
- les sources de données sont souvent mobiles [Vigier 00].

Les sources de données sont très hétérogènes, elles peuvent être embarquées sur un véhicule, être à demeure sur une parcelle, être constituées d'un ordinateur, d'un capteur

intelligent... Il faut donc des modules de communication les plus adaptables possible à ces différents types de noeuds.

Les données ayant un caractère spatial, il semble évident de choisir comme système de gestion des données un Système d'Information Géographique (SIG) [Thirion 00]. Ce système est lui-même relié aux acteurs avals de la filière via Internet afin de poursuivre la diffusion des données tout au long de la chaîne de transformation [Efken 98].

Afin d'avoir un flux d'informations fiable et rapide, il convient de mettre en réseau les sources d'information et de stocker les données sur un serveur au niveau de l'exploitation. Cette mise en réseau des différentes sources d'informations de l'exploitation est complexe.

A cause de la mobilité des sources, qui sont géoréférencées via l'utilisation de GPS [2], les solutions filaires de mise en réseau ne peuvent pas répondre complètement au problème. Il semble donc opportun d'envisager l'utilisation de réseaux sans fil [Charvat 01].

Si un réseau sans fil est créé entre les différents équipements de l'exploitation, il est possible de développer de nouvelles applications comme le suivi et la maintenance du matériel, la gestion des flottes de véhicules, la sécurité des opérateurs [Berducat 05, Boffety 05]. Les équipements modernes sont de plus en plus performants, spécialisés et onéreux et doivent souvent être achetés en commun par plusieurs acteurs. Les équipements sont gérés par des coopératives qui doivent pouvoir assurer le suivi, la maintenance et la facturation des équipements. Si ceux-ci sont en liaison permanente avec la coopérative, la gestion est optimisée. La sécurité des opérateurs peut également être améliorée par la mise en réseau des équipements, des messages d'urgence peuvent être automatiquement envoyés en cas d'accident ou d'incident sur une machine : l'opérateur n'est plus isolé lors de ses travaux.

De même, les travaux récents sur la robotique mobile en milieu naturel tendent à faire apparaître dans l'agriculture moderne de nouveaux équipements et de nouvelles méthodes de travail [Lenain 05]. Les engins seront partiellement ou totalement autonomes d'ici quelques années. Il faut donc qu'ils puissent dialoguer avec un éventuel opérateur déporté ou même avec d'autres équipements autonomes : la coopération entre machines devient même envisageable via ce type de réseau sans fil [Noguchi 04].

Au-delà de l'agriculture, les besoins d'acquisition de données au service de l'environnement sont de plus en plus importants. En effet, afin de mieux appréhender les évolutions spatio-temporelles des phénomènes naturels et des milieux, de nombreux réseaux de collecte d'information se mettent en place. L'effet des catastrophes naturelles peut être diminué par la mise en place de réseaux d'alerte pour la prévention mais également par le déploiement de réseaux de communication pour les secours. Dans le rapport de conjoncture 2004, les experts du Comité National de la Recherche Scientifique du CNRS écrivent dans le chapitre intitulé "Environnement, risques, sécurité" [Campillo 05] :

[2] Global Positioning System

Les réseaux de communication sont des outils privilégiés dans les phases de surveillance et d'alerte. Dans le cadre de la surveillance, le réseau sert à acheminer les données issues de différents capteurs et doit adapter sa topologie à leur distribution. Le système de communication devra offrir les garanties de qualité de service correspondant à l'importance des informations transportées. Il faut donc prévoir une éventuelle redondance des liens et la mise en place de mécanismes déterministes d'acheminement de l'information (temporalité, spatialité, etc.). Il faut veiller à sécuriser le système de communication au regard de certaines malveillances, afin d'assurer sa disponibilité et garantir l'intégrité des informations qu'il véhicule pour éviter de fausses alertes ou le masquage d'alarmes réelles. Dans le cadre de l'alerte des autorités, des différents services de la protection civile et des citoyens deux scénarios sont envisageables. Le premier considère le cas où les infrastructures de communication ont été sauvegardées à l'issue de la catastrophe. Les procédures d'alerte, préalablement établies, utilisent ces infrastructures. Il est alors nécessaire de protéger les réseaux des risques de saturation engendrés par une situation de panique, en utilisant, par exemple, le contrôle d'admission pour privilégier les communications stratégiques. Les vecteurs de diffusion classiques à destination de la population (radio, TV, etc.) peuvent aujourd'hui être complétés par la mise en place de systèmes automatiques d'appels téléphoniques, d'envoi de messages électroniques, SMS, etc.

Le second cas de figure est relatif aux infrastructures de communication endommagées par la catastrophe. Il s'agit alors de remettre en place, au plus vite, un système de communication opérationnel pour les services de sécurité et de secours. C'est bien sûr les technologies sans-fil qui seront les plus faciles à déployer. La réquisition de supports de communication alloués à des services non prioritaires, non affectés par la catastrophe, doit également être réalisable. En effet, si les réseaux réservés aux autorités et services de l'état (réseau Rimbaud par exemple) restent généralement opérationnels, certaines catastrophes récentes (AZF, etc.) montrent que toutes les institutions s'inscrivant dans le schéma général d'organisation des secours ne disposent pas des moyens de communication nécessaires à leur pleine efficacité.

La nécessité d'avoir des moyens de communication sans fil pour pouvoir faire de l'acquisition de données spatio-temporelles est donc une problématique importante pour l'agriculture et l'environnement : ce type de réseaux peut être rassemblé sous le vocable de ***réseaux agri-environnementaux***. Comme le soulignent les experts du CNRS [Campillo 05], ces réseaux doivent avoir un niveau de ***QoS*** en adéquation avec les informations à transporter.

Les réseaux basés sur les technologies de télécommunication sans fil sont donc bien adaptés aux réseaux agri-environnementaux. Il existe de nombreuses solutions de télécommunication radio et il est donc pertinent de s'interroger sur la technologie la plus adaptée

au contexte.

Les solutions de communication par liaison sans fil sont nombreuses et les premières qui viennent à l'esprit sont les réseaux de téléphonie mobile [Tabbane 97]. Ces technologies sont bien répandues et relativement fiables. Mais leur utilisation est coûteuse pour des volumes de données importants et les capacités de ces réseaux en bande passante sont encore limitées, même pour les réseaux de troisième génération. De plus, dans le contexte des réseaux agri-environnementaux, les zones rurales concernées ne sont pas ou peu desservies par les réseaux de téléphonie mobile.

Les nouveaux réseaux sans fil [Mühlethaler 02] basés sur les technologies radio de type IEEE 802.11x, Bluetooth, etc., permettent d'avoir des débits importants proches de ceux des réseaux filaires. Ils semblent bien adaptés aux réseaux agri-environnementaux. Par contre, les fréquences mises en oeuvre pour ce type de transmission sont relativement élevées ($\geq$ 2,4 GHz) et les puissances faibles ($\leq$ 100 mW), ce qui entraîne des problèmes de transmission liés aux interférences et donc des portées bien moindres que les réseaux téléphoniques (de l'ordre de quelques centaines de mètres contre plusieurs kilomètres).

La mise en oeuvre des réseaux sans fil peut se faire de deux manières : avec ou sans point d'accès [Trezentos 02]. Le mode à point d'accès se rapproche de la structure en cellules des réseaux téléphoniques, mais avec une taille de cellule beaucoup plus petite [Tabbane 97]. Pour couvrir une grande zone, comme dans le cas d'un réseau agri-environnemental, il faut donc multiplier les points d'accès, ce qui entraîne une infrastructure relativement lourde et onéreuse à mettre en place. Actuellement, il existe des expérimentations dans le contexte agricole qui ont été menées avec succès en utilisant des points d'accès IEEE 802.11b [McKinion 03]. Mais le nombre nécessaire de points d'accès est important et entraîne des coûts trop lourds pour une exploitation agricole non expérimentale.

Le second mode de fonctionnement des réseaux sans fil est celui sans point d'accès : il est dit ***mode ad hoc*** [Perkins 00]. Dans ce cas, chaque mobile ou noeud du réseau communique directement avec ses voisins présents dans sa zone de couverture radio. Si chaque noeud a des possibilités de routage, l'information peut être relayée de proche en proche jusqu'au destinataire final. La question du routage dans ce type de réseau est complexe car chaque noeud est mobile et peut disparaître, ce qui rend les routes éphémères contrairement aux réseaux filaires ou dans le cas de point d'accès. De nombreux travaux de recherche sont en cours sur cette thématique [Abolhasan 04, Royer 99] mais peu de réelles applications existent [Kiess 07].

La solution du mode ad hoc pour les réseaux agri-environnementaux semble être la plus adaptée. Des expérimentations ont été menées sur des réseaux de capteurs par de nombreuses équipes [Akyildiz 02, Cardell-Oliver 04, Cunha 05, Estrin 01, Hirafuji 04, Wang 06]. Tous ces travaux montrent que l'utilisation de réseaux de capteurs, qui sont des réseaux ad hoc, pour la surveillance de l'environnement est possible. Mais le cas des

réseaux agri-environnementaux est plus complexe car les sources de données sont plus hétérogènes que dans le cas des réseaux de capteurs. Dans les réseaux de capteurs, ce sont souvent les mêmes noeuds qui sont multipliés pour surveiller un lieu, un milieu [Hill 02]. En revanche, dans un réseau agri-environnemental, il y a bien évidemment des capteurs, mais aussi des engins agricoles avec des ordinateurs embarqués, des usagers avec des PDA[3], des bâtiments avec des ordinateurs, des installations avec des automates... La problématique est donc différente des réseaux de capteurs purs. Il faudra donc adapter ou faire évoluer les caractéristiques des protocoles de routage existants pour bien répondre aux caractéristiques de ces réseaux [Chanet 04a].

Tant pour l'agriculture que pour l'environnement, il faut donc observer, mesurer, enregistrer un grand nombre de paramètres. Le volume d'informations mis en jeu n'est plus compatible avec une démarche manuelle : il faut réaliser toutes ces opérations de collecte de données de manière automatique afin de les rendre plus fiables et en phase avec les évolutions spatio-temporelles des phénomènes (suivi de polluants, surveillance de site...).

La première approche envisageable pour suivre ces paramètres est l'utilisation de satellites : c'est une approche à grande échelle. Grâce aux résolutions actuelles des images satellites (< 1 m) et à leur diversité spectrale, cette technique peut être utilisée pour de multiples applications agri-environnementales : le suivi de l'évolution du climat [Lepoutre 89], la surveillance de la ressource en eau [Bercher 06], les besoins des cultures [Vidal 96]... Cette approche est très pertinente, mais le coût élevé des données et la fréquence d'acquisition ne permettent pas un suivi temporel fin. L'emploi du satellite ne peut pas permettre d'assurer la traçabilité au sein des exploitations agricoles ou de déclencher une alerte en cas d'inondation, le satellite n'étant pas forcément au bon endroit au bon instant.

Une deuxième solution pour le suivi des paramètres agri-environnementaux est l'utilisation d'images aériennes issues d'avions ou de drones[4] [Brisset 04]. Dans ce cas, la résolution est supérieure (3 à 20 cm) et les données sont toujours multispectrales. Les données sont ici à une échelle intermédiaire. Le coût est moindre que dans le cas de données satellitaires, mais la fréquence d'acquisition est toujours relativement faible et ne permet donc qu'une utilisation ponctuelle de cette technique (deux à trois fois par an). Cette technologie d'acquisition ne peut donc pas assurer un suivi ou une surveillance précise des phénomènes.

Face à ces techniques lourdes, il apparaît des mesures à l'échelle locale (au niveau d'une parcelle agricole par exemple) qui permettent d'avoir un suivi régulier de l'évolution de différents paramètres : humidité du sol, apport en eau lors de l'irrigation, état de croissance des plantes, capteur de variation de rendement à la récolte... Jusqu'à présent, la difficulté de mise en oeuvre de ces moyens de mesure distribués, notamment pour la collecte des informations, les destinait à des sites bien particuliers comme des parcelles

[3] Personal Digital Assistant

[4] `http://www.lavionjaune.fr/`

Figure 1.1 – Un exemple de capteurs sur une parcelle agricole expérimentale (Cemagref/J. M. Le-Bars)

agricoles expérimentales (voir la Figure 1.1) ou des sites sensibles comme les volcans [Feriot 00]. Mais l'avènement des technologies sans fil permet de déployer facilement de nombreuses sources d'acquisition sans avoir de problème de relevé d'information ou de câblage. De plus, le coût de ces technologies est maintenant compatible avec une utilisation pour l'agriculture et l'environnement. La construction de véritable Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) ou Wireless Sensor Networks (WSN) est maintenant possible dans ce secteur au même titre que pour la médecine ou l'habitat, comme cela le fut il y a quelques années dans le secteur militaire [Akyildiz 02].

La mise en réseau de capteurs, d'équipements, etc., est donc maintenant envisageable afin de répondre :

- aux enjeux de collecte de données sur les bonnes pratiques liées à l'agriculture raisonnée ;
- aux enjeux de surveillance de l'environnement afin d'assurer un développement durable.

Si de tels réseaux sont déployés, de nouvelles applications peuvent être développées comme la mise en place de réseaux d'alerte pour les catastrophes naturelles, l'optimisation de l'utilisation des équipements agricoles [Chanet 05].

Les réseaux sans fil ad hoc sont donc une bonne solution pour les réseaux agri-environnementaux. Mais les réseaux pour l'agriculture et l'environnement présentent des particularités qui doivent être explicitées afin de bien prendre en compte leurs spécificités pour définir leur fonctionnement et plus particulièrement le protocole de routage qui leur convient le mieux.

1.2 Les caractéristiques des réseaux agri-environnementaux

Les réseaux agri-environnementaux ont des spécificités qui peuvent être segmentées selon trois critères :

- *l'hétérogénéité*, ces réseaux rassemblent des sources d'information de différentes natures (capteurs, engins mobiles, PDA...) qui doivent cohabiter ;
- *la spatialité*, les différents éléments sont disposés ou évoluent dans la nature loin des infrastructures de communication classique et l'information recueillie doit être géoréférencée ;
- *la mise en oeuvre*, ces réseaux doivent être facilement déployés et les noeuds doivent avoir une longévité, notamment en énergie, compatible avec leur tâche de surveillance.

1.2.1 Des réseaux hétérogènes

Les réseaux agri-environnementaux sont hétérogènes pour différentes raisons. Cette hétérogénéité vient tout d'abord de la diversité des sources d'information :

- des équipements embarqués sur des machines, comme par exemple des dispositifs de suivi de matériels, des dispositifs d'enregistrement des pratiques agricoles [Chanet 05, Charvat 01] ;
- des équipements fixes au sein de bâtiments comme de la vidéo pour la surveillance d'animaux [Boffety 06] ;
- des équipements de type PDA pour des outils de cartographie nomade [Charvat 01] ;
- des capteurs dans les parcelles pour mesurer par exemple l'humidité du sol ou la température, les rayonnements UV et IR [Cardell-Oliver 04, Hirafuji 04] ;
- des capteurs enfouis dans le sol pour ne pas gêner les évolutions de véhicules sur le sol comme des capteurs d'humidité [Akyildiz 06].

Ces réseaux rassemblent donc des dispositifs n'ayant ni les mêmes caractéristiques (fixe ou mobile, avec ou sans source d'énergie...), ni les mêmes performances (ordinateurs type PC, PDAs, capteurs type température ou humidité...), ni les mêmes besoins en termes de volume d'information à échanger (images, valeur ponctuelle...). L'interfaçage doit pouvoir se faire avec des capteurs [Cunha 05], des réseaux embarqués [Chanet 04a]... De plus, ces différents éléments doivent pouvoir cohabiter au sein du même réseau afin d'interagir et de communiquer avec un SI [Chanet 04b] et être en relation avec une infrastructure liée à Internet. Ce sont donc des réseaux mixtes : ad hoc et infrastructure.

Afin de pouvoir gérer cette hétérogénéité, le protocole de routage ad hoc doit pouvoir fonctionner sur des dispositifs de faibles capacités, tant énergétiques que calculatoires. Il devra être capable de supporter de manière transparente différents supports de communication sans fil afin de satisfaire pleinement les besoins en termes de bande passante et de consommation.

Ces réseaux sont hétérogènes mais peuvent malgré tout être divisés en parties (ou clusters) homogènes en termes de type de noeuds (capteurs sur une parcelle) ou de tâches à accomplir (chantier de récolte) ou de lieu (tous les noeuds présents dans une parcelle). Une division du réseau global en clusters intégrant des données contextuelles sur la nature du cluster peut être envisagée (voir la Figure 1.2) [Chanet 03].

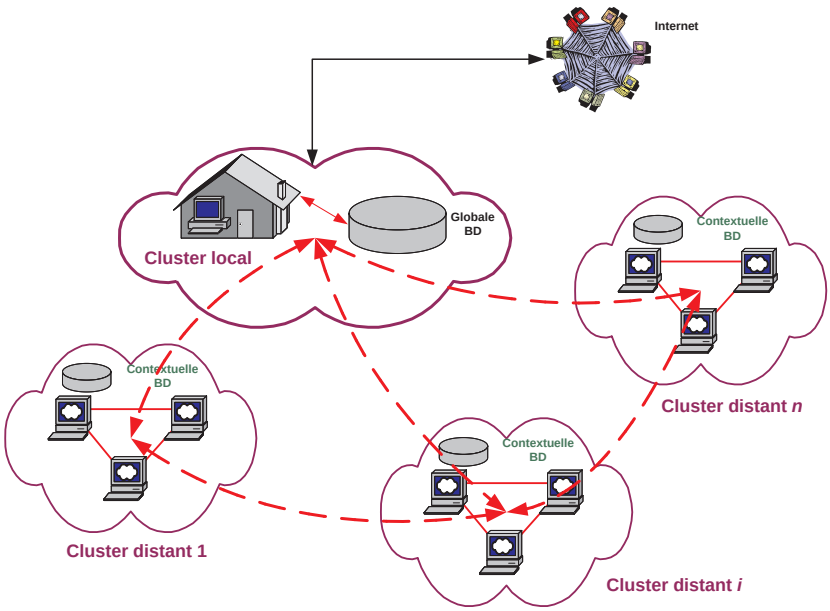

Figure 1.2 – L'architecture en clusters des réseaux agri-environnementaux

En résumé, afin de répondre à cette hétérogénéité, le protocole de routage à mettre en oeuvre doit :

- être multisupports,
- être capable de supporter un mode ad hoc et un mode infrastructure,
- être implémentable sur des systèmes à faible ressource énergétique,
- être facilement interfaçable avec des sources analogiques (capteurs), des réseaux filaires (Iso Bus, ADSL...),
- pouvoir supporter une architecture de type cluster.

1.2.2 Des spécificités spatiales

Les réseaux agri-environnementaux ont différentes spécificités d'ordre spatial. En effet, les noeuds du réseau servent fréquemment à faire de l'acquisition de données qui, dans le cadre des applications liées à l'agriculture et l'environnement, doivent être géoréférencées. Cette notion correspond au fait que la position géographique de l'origine des données doit être connue [Berducat 00, Vigier 00]. Cela entraîne que la position des capteurs fixes doit être connue et que les noeuds mobiles doivent disposer d'un récepteur GPS pour

les localiser [Lebars 97]. Cette information géographique imposée par les applications est donc disponible pour le routage de l'information.

Les réseaux pour l'agriculture et l'environnement sont, par nature, principalement déployés en zone rurale ; il faut donc tenir compte de la présence de végétation, de relief... En outre, la densité des noeuds peut être faible, il faut donc envisager de pouvoir avoir des distances importantes entre certains noeuds ou entre les clusters (voir la Figure 1.2 page précédente). Ceci devra être pris en compte dans la problématique de routage de l'information.

Les noeuds mobiles ont, quant à eux, des vitesses relativement faibles (inférieure à 50 km/h). Cette mobilité restreinte n'oblige pas à avoir un routage très réactif, car la topologie globale du réseau reste relativement stable.

Ces spécificités spatiales entraînent les conséquences suivantes sur le routage de l'information :
- l'information géographique est disponible au niveau des noeuds (position, vitesse),
- des distances importantes peuvent exister entre certains noeuds du réseau,
- la mobilité des noeuds est réduite et les réseaux agri-environnementaux sont donc plutôt stables.

1.2.3 Des contraintes de mise en oeuvre

Les réseaux agri-environnementaux sont par définition situés en zone rurale, au sein de parcelles. Les ressources en énergie sont donc limitées et les systèmes de communication doivent être conçus en prenant en compte cette problématique de l'énergie : c'est la conception "energy driven" [Heinzelman 00, Min 02]. L'utilisation du médium de communication doit être faite en intégrant cette problématique : le routage ne doit pas consommer beaucoup de la ressource énergétique. Il faut en outre privilégier des technologies radios à faible consommation pour les noeuds disposant de peu de ressources énergétiques.

La bande passante étant limitée sur ce type de réseau, il faut donc l'utiliser au mieux grâce à une QoS adaptée. Dans le cas de plusieurs technologies radio, il faut que la QoS utilise ces différents types de communication.

Les contraintes de mise en oeuvre viennent également de la diversité des éléments en réseau, ce qui revient à concevoir un module de communication à même de gérer cette diversité. Il faut donc que le dispositif de communication soit modulable, facilement déployable, et pouvant s'interfacer avec de nombreux dispositifs tel que des capteurs, des ordinateurs, d'autres réseaux...

De plus, les modules sont souvent en conditions extérieures difficiles (humidité, pluie, chaleur). Il faut bien intégrer ces éléments, notamment au niveau des interfaces. En outre, le coût doit être compatible avec les applications agricoles, c'est-à-dire faible.

1.3 Synthèse

Les réseaux agri-environnementaux sont donc destinés à fédérer différents noeuds, fixes ou mobiles et dispersés géographiquement. Les technologies de télécommunication sans fil sont les plus à même de répondre à ces contraintes. En outre, leur utilisation devra se faire via un mode de gestion répartie : les réseaux sans fil ad hoc ont des caractéristiques pouvant correspondre aux besoins des réseaux agri-environnementaux.

Les réseaux pour l'agriculture et l'environnement ont donc des spécificités de différentes natures qui doivent être prises en compte dans le choix d'un protocole de routage adapté. Ces spécificités sont de trois types : *hétérogénéité*, *spatialité* et *mise en oeuvre*.

Ces particularités induisent des conséquences qui peuvent être vues comme des avantages ou des inconvénients dans le choix d'un protocole de routage adapté à ce type de réseaux (voir la Table 1.1).

	Avantages	**Inconvénients**
Hétérogénéité	Possibilité de clusters Noeuds à ressources élevées	Type de noeuds différents Mélange ad hoc/infrastructure Noeuds à ressources faibles
Spatialité	Présence de GPS Vitesse mobile faible	Dispersion des noeuds Densité faible de noeuds
Mise en oeuvre	Noeuds dédiés à une tâche	Coût alloué aux noeuds faible Bande passante faible (distance importante entre noeuds) Milieu hostile

Table 1.1 – Les spécificités des réseaux agri-environnementaux

Les réseaux agri-environnementaux sont donc, en partie, une catégorie de réseaux ad hoc à part entière au même titre que les catégories classiquement rencontrées dans la littérature [Perkins 01a] : militaire, conférences, réseaux de capteurs, services d'urgence. Mais leurs particularités obligent à avoir une approche globale de conception. En effet, il est impossible de différencier le protocole de routage, des technologies radio utilisées, de la consommation énergétique des noeuds, de la QoS dans le réseau. L'approche retenue dans ces travaux est donc une approche intégrée où les dimensions matérielles et logicielles de la problématique sont prises en compte.

Après avoir défini les réseaux agri-environnementaux au cours de ce chapitre, nous allons, dans le suivant, faire un état de l'art des technologies de télécommunication sans fil et des protocoles de routage ad hoc afin de voir ce qu'il est possible de mettre en oeuvre au niveau de nos réseaux.

⋆⋆⋆⋆⋆⋆⋆

Chapitre 2

Les réseaux sans fil ad hoc : état de l'art

"Il faut prendre conscience de l'apport d'autrui, d'autant plus riche que la différence avec soi-même est plus grande."
Albert Jacquard, *Petite Philosophie à l'usage des non-philosophes*

Sommaire

2.1 Les réseaux sans fil 18
2.1.1 Les différents standards 18
2.1.2 La mise en oeuvre des réseaux sans fil 25
2.1.3 Synthèse 26
2.2 Les protocoles de routage ad hoc 28
2.2.1 Le principe du routage dans les réseaux ad hoc 28
2.2.2 Les protocoles de routage proactifs 29
2.2.3 Les protocoles de routage réactifs 32
2.2.4 Les protocoles de routage hybrides 35
2.2.5 Les protocoles de routage géographiques 38
2.2.6 Synthèse 42
2.3 Le routage dans les réseaux agri-environnementaux 45
2.3.1 Un comparatif des protocoles existants 45
2.3.2 La nécessité d'un nouveau protocole 46

Les réseaux sans fil ad hoc peuvent potentiellement apporter une solution pour le déploiement de réseaux agri-environnementaux. Il convient donc de faire un état de l'art de ces technologies et des différents moyens de les mettre en oeuvre.

Afin de réaliser cet état de l'art, nous devons définir différents éléments : tout d'abord les réseaux ad hoc concernent les technologies de communication sans fil.

Dans un premier temps, nous nous attachons donc à présenter les différentes solutions radio existantes avec leurs caractéristiques. Ensuite, dans un deuxième temps, nous explicitons le fonctionnement dit ad hoc d'un réseau et nous détaillons plus particulièrement les différents protocoles permettant d'assurer le routage de l'information dans ce type de structure. Enfin, dans un troisième temps, les avantages et les inconvénients de ces protocoles sont exposés pour montrer la nécessité de développer un nouveau protocole dédié aux réseaux agri-environnementaux.

Cet état de l'art permet d'introduire notre protocole de CIVIC décrit dans le chapitre suivant en le justifiant.

2.1 Les réseaux sans fil

Les besoins en termes de communication ont beaucoup évolué ces dernières années. La mobilité est une nouvelle dimension à prendre en compte dans les applications informatiques, y compris dans le domaine de l'agriculture et de l'environnement. Les coûts des équipements sont maintenant faibles et ils sont compatibles avec le déploiement massif des technologies radio. Des applications nécessitant la transmission d'informations entre équipements informatiques peuvent être envisagées :

- sans fil (sous forme de trames),
- en utilisant les services et les protocoles similaires aux réseaux filaires comme le http[5], le FTP[6], etc.,
- sur des distances courtes à moyennes (jusqu'à quelques kilomètres),
- avec des débits compatibles avec les besoins des applications actuelles (son, images, vidéo).

Pour cela, il existe différents standards que nous allons maintenant présenter.

2.1.1 Les différents standards

Il existe de nombreuses solutions pour échanger de l'information par liaison radio et, classiquement dans la littérature [Mühlethaler 02, Pujolle 03], les différentes techniques sont classées suivant leur débit et leur portée.

[5] HyperText Transfer Protocol
[6] File Transfert Protocol

Les technologies de communication cellulaires, également dénommées Wireless Wide Area Network (WWAN), comme le GSM[7], le GPRS[8] ou l'UMTS[9], présentent des débits moindres et des portée supérieures aux technologies utilisées pour les réseaux sans fil tout comme les communications satellites (voir la Figure 2.1). Cette capacité d'avoir un débit élevé permet d'utiliser ces nouvelles technologies radio pour un usage informatique, c'est-à-dire la création de réseaux performants. Ces techniques peuvent être segmentées en trois catégories :

- les Wireless Personal Area Network (WPAN) qui sont constitués des standards 802.15 de l'IEEE ;
- les Wireless Local Area Network (WLAN) qui sont principalement constitués des normes IEEE 802.11x ;
- les Wireless Metropolitain Area Network (WMAN) qui regroupent les standards IEEE 802.16 et 802.20.

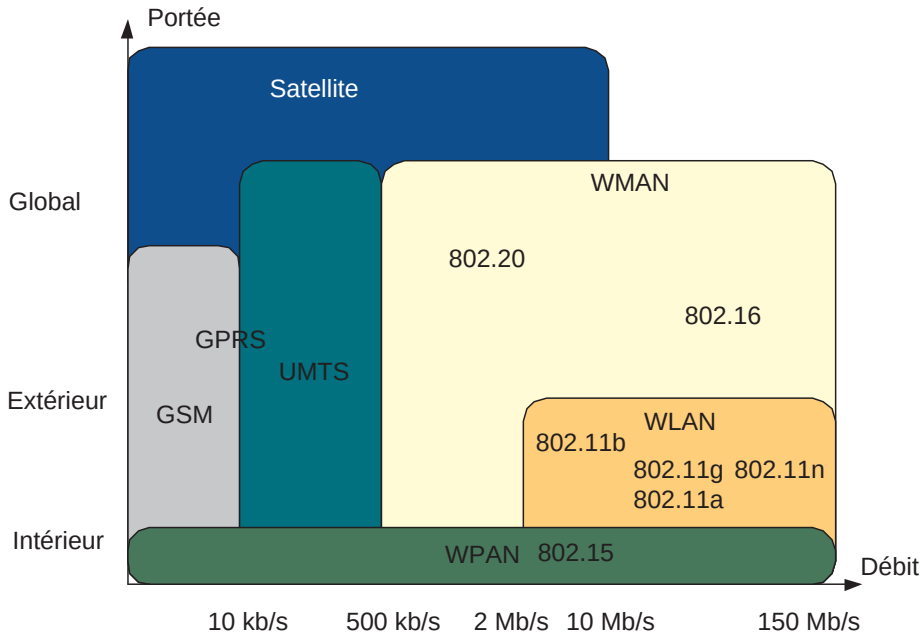

Figure 2.1 – La portée et le débit des différents standards de communication sans fil [Pujolle 03]

Les WMAN sont, comme leur nom l'indique, des réseaux de grandes dimensions (plusieurs kilomètres). Dans cette catégorie, se trouvent la norme IEEE 802.16 ou WIMAX[10]

[7] Global System for Mobile communication
[8] General Packet Radio Service
[9] Universal Mobile Telecommunications System
[10] Worldwide Interoperability for Microwave Access

et les boucles locales radios. Ces technologies nécessitent une infrastructure importante et l'intervention d'opérateurs comme dans le cas des solutions cellulaires et sont donc soumises à des abonnements payants. Nous ne considérerons donc que des solutions facilement déployables et pouvant servir de base à la construction de réseaux faciles à mettre en oeuvre à partir de véhicules, de PDA, de bâtiments, tout en pouvant être reliés aux réseaux traditionnels filaires : les WPAN et les WLAN.

Les "Wireless Personal Area Network"

Les WPAN concernent en général les réseaux de faibles portées, de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. L'objectif premier de ces réseaux est de connecter des périphériques (imprimante, GPS...) à un ordinateur. De par leur utilisation, ces technologies offrent des débits faibles car elles sont destinées à des périphériques ne demandant pas un gros volume d'échange ($\leq$ 1 Mo).

De plus, elles consomment peu d'énergie, moins de 1 mA en mode veille pour certaines technologies. Dans le cas d'appareils portables équipés de batterie (PDA, oreillette de téléphone...), l'autonomie est une variable très importante. Cette grande autonomie permet de les utiliser aussi pour des réseaux de capteurs comme par exemple au sein des systèmes Mica développés par l'Université de Berkeley qui offre une portée de l'ordre de 100 m pour une consommation maximum de 227 mA [Hill 02].

Les deux principales technologies de WPAN sont le Bluetooth et le ZigBee.

Le Bluetooth ou IEEE 802.15.1 [Blu 04] a été développé en 1994 et sa généralisation remonte à 1998 par la création d'un consortium de 2000 acteurs de l'industrie des télécommunications[11].

Le mode de représentation classique de l'implémentation des protocoles de communications est le modèle OSI[12] [ISO 94]. Cette formalisation est définie selon une pile à sept couches : application, présentation, session, transport, réseau liaison et physique. Les données transitent depuis la couche application jusqu'à la couche physique à l'envoi et inversement à la réception. A chaque niveau de la pile, les données sont encapsulées. Le standard Bluetooth s'appuie sur une pile de protocoles propre plus complète que celle des réseaux filaires traditionnels car, en plus de l'IP, elle peut supporter de nombreuses applications via différents profils. La bande de fréquence utilisée au niveau de la couche radio s'étend de 2,4 GHz à 2,4835 GHz. Elle est divisée en 79 canaux de 1 MHz. Le codage de l'information se fait par saut de fréquences sur ces canaux à la cadence de 1600 sauts/s, ce qui rend cette technologie relativement robuste vis-à-vis des perturbations. Le débit offert est de l'ordre de 1 Mb/s. Cette technologie est principalement dédiée à la connexion de périphériques de manière sécurisée. Pour cela, la norme défini de nombreux

[11] `https://www.bluetooth.org/`
[12] Open System Interconnection

profils d'application pour gérer les différents types de liens comme par exemple le Basic Printing Profile (BPP), le Cordless Telephony Profile (CTP), le Serial Port Profile (SPP).

Le Bluetooth est peu adapté à la création de réseaux distribués de stations ayant des droits équivalents : il y a toujours dans cette technologie une relation de maître-esclave pour la gestion des connexions.

L'autre technologie de WPAN qui se développe de plus en plus est le ZigBee ou IEEE 802.15.4[13] [Zig 05]. Par rapport au standard Bluetooth, celui-ci présente un débit moindre (250 kb/s vs 1 Mb/s) mais consomme nettement moins d'énergie et est donc tout destiné aux réseaux de capteurs. La norme définit 27 canaux de communication différents répartis sur trois bandes de fréquences (la bande 868 MHz-868.6 MHz en Europe et 902 MHz-928 MHz aux Etats-Unis et la bande 2,4 GHz-2,48 GHz partout). Elle s'appuie sur une technique d'étalement de spectre par séquence directe (Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)), avec une modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) pour les bandes de fréquence centrale 868.3 MHz et 915 MHz et une modulation OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) pour la gamme 2,4 GHz-2,48 GHz, et sur un protocole d'accès au média de type CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Le standard ne définit que les couches MAC (Media Access Control) et physique du modèle OSI. Le principal avantage de ZigBee est de pouvoir supporter les réseaux distribués ad hoc.

Les "Wireless Local Area Network"

Les WLAN sont un domaine des télécommunications en pleine expansion. Ils font le pont entre la téléphonie et l'informatique et possèdent de nombreux avantages :

- ils permettent de rendre mobile les équipements informatiques ;
- ils autorisent des débits compatibles avec les applications informatiques actuelles ;
- ils utilisent des bandes de fréquences libres de droit d'utilisation ;
- ils ne nécessitent que peu ou pas d'infrastructure ;
- ils ont une mise en oeuvre aisée.

Il faut malgré tout pondérer tous ces avantages par le fait que les communications radio sont moins fiables que les filaires à cause des interférences radio, des problèmes de multitrajets des ondes, les irrégularités électromagnétiques... De plus, les WLAN sont moins sûrs que les réseaux filaires : le médium pour faire transiter l'information étant l'air, celui-ci est ouvert à d'éventuels intrus.

A l'heure actuelle, la famille de standards IEEE 802.11 [ANS 99] domine le domaine des WLAN. Il existait d'autres normes comme l'HIPERLAN (HIgh PErformance Radio Local Area Network) [EST 99], mais, grâce au poids économique de l'industrie américaine [Garelli 05], elles ont été supplantées par les normes IEEE qui ont d'ailleurs repris bon

[13] `http://www.zigbee.org/en/index.asp`

nombre de propositions des standards européens HIPERLAN (le IEEE 802.11a est très proche de l'HIPERLAN 2).

Le IEEE 802.11 est donc la norme pour les WLAN, connue aussi sous la dénomination Wi-Fi (Wireless Fidelity), qui correspond en réalité à un label délivré par le consortium d'industriels intitulé la "Wi-Fi Alliance" [14]. Ce label garantit l'interopérabilité des équipements issus de différents fabricants, mais par abus de langage, le terme Wi-Fi est également employé pour désigner les normes IEEE 802.11.

Par rapport au modèle OSI, le IEEE 802.11 ne concerne qu'une partie de la couche de liaison de données 2 et la couche physique 1 et reste donc entièrement compatible avec les couches supérieures (voir la Figure 2.2). Le standard est vu de manière transparente par les applications et les différents protocoles des couches supérieures (http, FTP, TCP/IP[15]...).

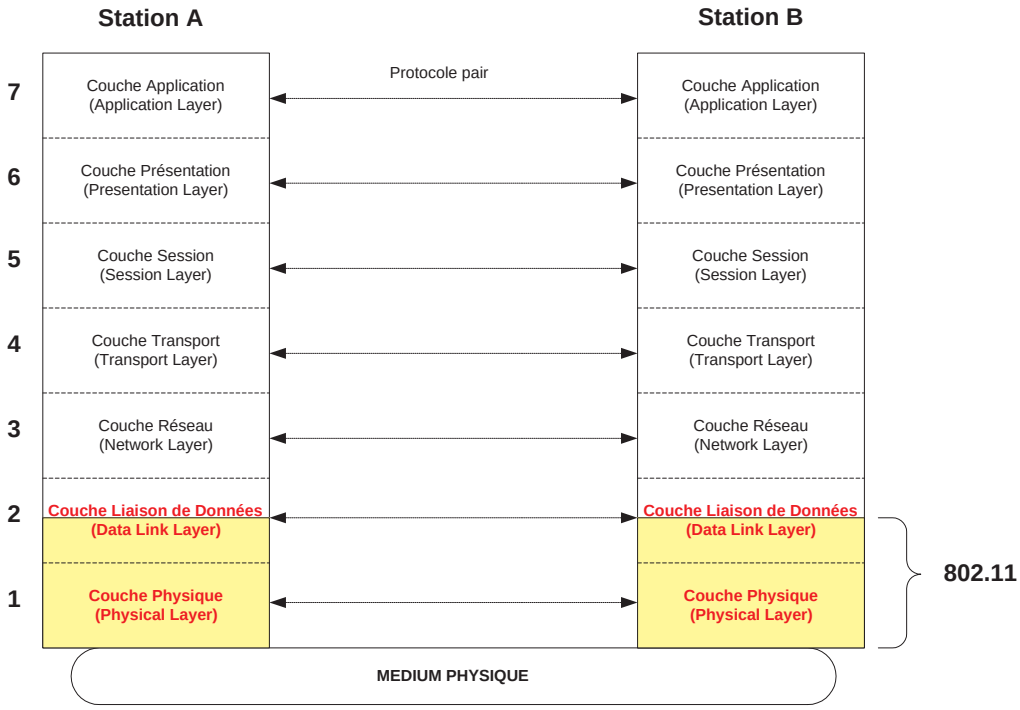

Figure 2.2 – La position du standard IEEE 802.11 dans le modèle OSI, d'après [ISO 94]

Au niveau de la couche de liaison de données, le IEEE 802.11 supporte deux mécanismes d'accès au médium : le PCF (Polling Coordination Function) et le DCF (Distributed Coordination Function).

[14] `http://www.wifialliance.com/`
[15] Transmission Control Protocol/Internet Protocol

Le PCF est un mode centralisé qui garantit à chaque station un accès minimum au médium, cette garantie est assurée par un point d'accès qui distribue les temps de parole à chaque station. Ce mode de fonctionnement est optionnel et est donc peu ou pas implémenté dans les équipements IEEE 802.11 [Trezentos 02].

Pour des réseaux sans infrastructure, le mécanisme d'accès au médium utilisé est le DCF [Dhoutaut 03]. Cet algorithme est basé sur le CSMA/CA. Ce mode consiste à écouter le médium avant d'émettre afin d'éviter les collisions. Lorsque le médium est libre, l'émission est possible mais, afin d'éviter que toutes les stations qui écoutaient se mettent à émettre au même moment, un compteur de valeur aléatoire est décrémenté par la station une fois que le médium est libre et elle attend la fin du décompte pour envoyer ses trames. Ce mécanisme a pour objectif de désynchroniser les émissions des différentes stations et de limiter le risque de collision.

Mais ce mécanisme n'est pas suffisant dans le cas de stations cachées. En effet, comme le montre la Figure 2.3, la station B peut atteindre A et C qui ne se voient pas. Donc, si A envoie des trames vers B, C ne peut pas les entendre et peut émettre vers B, les trames émises par C rentrant alors en collision avec celles de A. Afin d'éviter ce problème, des trames particulières, RTS (Ready To Send) et CTS (Clear To Send) sont utilisées. Avant d'émettre les trames de données, une station émet une trame RTS, par exemple A vers B ; B répond alors par une trame CTS indiquant qu'elle accepte l'échange de données. Dans ces 2 trames, la durée de l'échange est indiquée, donc toute station entendant une trame RTS ou CTS dont elle n'est pas destinataire (comme C), doit se taire pendant la durée indiquée dans la trame. Ceci permet de limiter les risques de collision en plus de l'algorithme de base CSMA/CA.

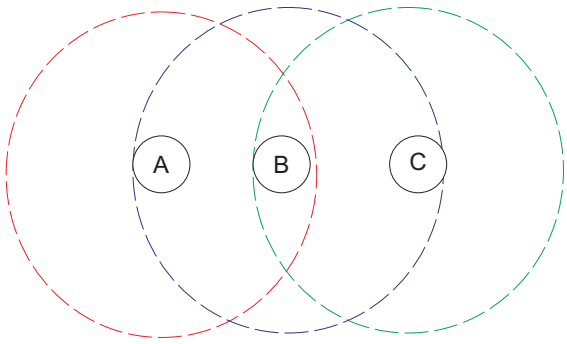

Figure 2.3 – Le problème des stations cachées avec le CSMA/CA

Le standard IEEE 802.11 intervient également au niveau de la couche physique du modèle OSI (voir Figure 2.2 page ci-contre). Plusieurs bandes de fréquences sont utilisées (2,4 GHz ou 5 GHz) ainsi que différentes techniques de modulation et de codage de l'information.

Le standard IEEE 802.11 se décline donc en différentes normes [Trezentos 02] :

- **Couche liaison**
  - IEEE 802.11e (2003) : QoS ;
  - IEEE 802.11i (2003) : Amélioration de la sécurité ;
  - IEEE 802.11f (2003) : Gestion des changements de point d'accès (Handovers) ;
- **Couche physique**
  - IEEE 802.11a (2001) : Vitesse jusqu'à 54 Mb/s, fréquence de 5 GHz, modulation de type OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ;
  - IEEE 802.11b (1999) : Vitesse jusqu'à 11 Mb/s, fréquence de 2,4 GHz, modulation de type DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) ;
  - IEEE 802.11g (2003) : Vitesse jusqu'à 54 Mb/s, fréquence de 2,4 GHz, modulation de type OFDM ;
  - IEEE 802.11n (2006-2007) : Vitesse jusqu'à 320 Mb/s, fréquences de 2,4 et 5 GHz, modulation de type OFDM et les antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output) utilisant plusieurs canaux simultanément.

Il faut malgré tout se méfier des débits annoncés car ce sont des débits théoriques qui en pratique sont bien moindres à cause du médium radio et des mécanismes d'accès à ce médium. La Figure 2.4 donne un aperçu des débits réellement utilisables pour différentes normes de WLAN en comparaison de l'Ethernet filaire qui a un bien meilleur rendement.

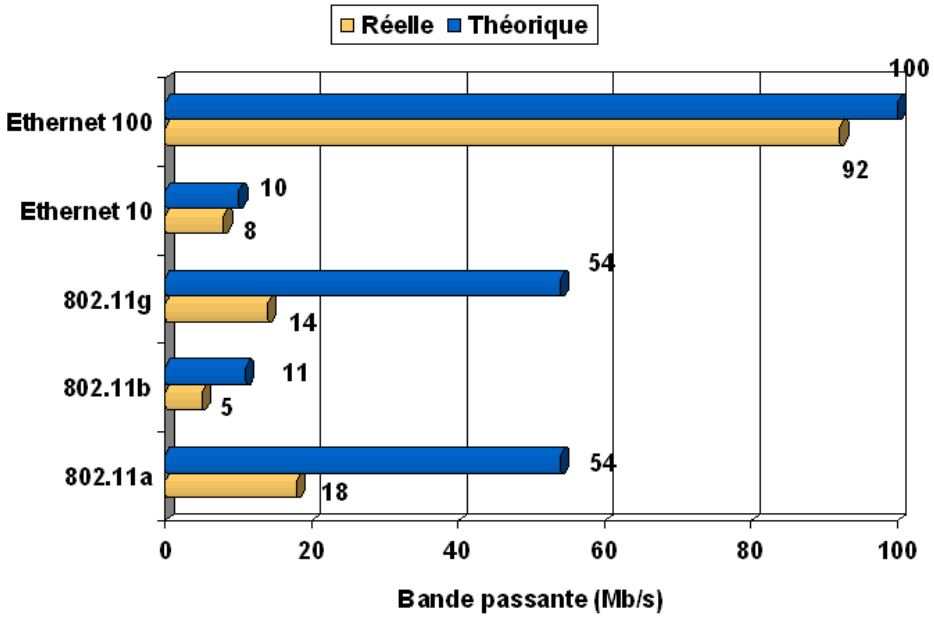

Figure 2.4 – Les bandes passantes théoriques et réelles des différents standards de WLAN d'après [Pujolle 03]

Les WLAN ont des portées d'émission de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres en fonction des antennes utilisées et des obstacles présents. Ces portées permettent d'utiliser les WLAN en extérieur.

2.1.2 La mise en oeuvre des réseaux sans fil

Les WPAN et les WLAN disposent de deux modes de fonctionnement : le mode centralisé et le mode distribué ou ad hoc.

Le mode de fonctionnement centralisé

Le mode de fonctionnement centralisé est basé sur la présence d'un noeud maître au sein du réseau qui administre les communications.

Dans le cas des WPAN (comme Bluetooth), c'est un noeud qui prend en charge ce rôle de chef d'orchestre du réseau. Les autres noeuds du réseau sont alors les esclaves du noeud maître : ce sont des "Piconet" (par exemple dans le cas du Bluetooth un maître peut avoir jusqu'à 7 esclaves en mode actifs et 255 esclaves en mode passif ou esclaves parked). Les esclaves ne peuvent pas communiquer entre eux. Des réseaux plus étendus peuvent être créés, dits "Scatternet", où un esclave peut avoir plusieurs maîtres, ce qui permet de relier entre eux des Piconet (voir la Figure 2.5).

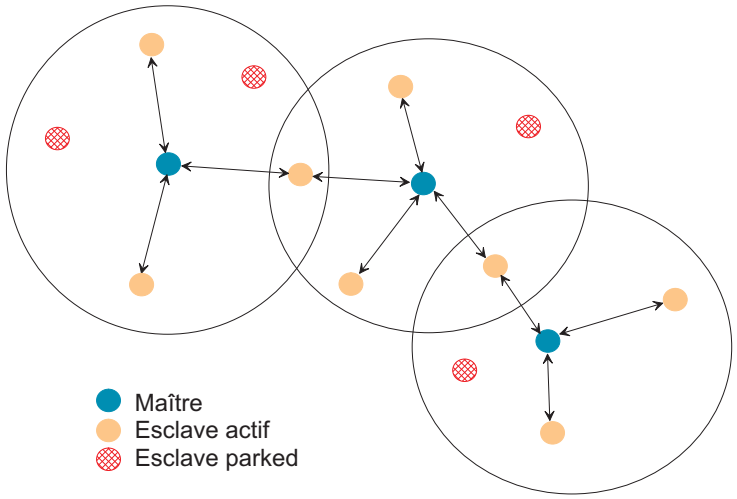

Figure 2.5 – Un exemple de Scatternet composé de trois Piconet

Dans le cas des WLAN, un équipement spécifique se voit attribuer cette fonction, c'est le point d'accès. Ce mode de fonctionnement permet d'avoir un réseau relativement stable et de gérer la QoS. Le point d'accès permet de contrôler l'accès des stations au réseau et de leur attribuer des ressources. En revanche, tous les noeuds du réseau doivent être à

portée radio du point d'accès. Si le réseau doit être plus grand que cette portée, il faut multiplier les points d'accès : c'est le type de fonctionnement utilisé dans les bureaux, les aéroports, les gares, les hôtels, etc., où des accès Internet sont fournis au public via les "Hotspot"[16].

Le mode de fonctionnement ad hoc

Les réseaux sans fil ont également un mode de communication distribué dit ad hoc. Ce mode correspond au cas où tous les noeuds du réseau ont le même rôle et dialoguent deux à deux sans relation maître-esclave ou sans point d'accès. Ce mode est intégré dans le fonctionnement de base des WLAN et dans certains WPAN comme le ZigBee. Mais ce mode, tel que défini dans les standards, est limité : en effet, pour dialoguer entre eux, les noeuds doivent être à portée radio, ce qui limite la couverture de tels réseaux.

Ce mode de fonctionnement de base peut être étendu par l'ajout au niveau des noeuds d'un protocole de routage qui permet aux noeuds de propager les informations dans le réseau même s'ils ne sont pas destinataires. Cela permet au noeud de se déplacer tout en gardant une connectivité avec les autres membres du réseau : ce sont des MANET (Mobile Ad hoc NETwork) [Corson 99, Giordano 02]. Les travaux de recherche sur ces protocoles de routage sont fédérés au sein de l'IETF[17] (Internet Engineering Task Force), organisation de normalisation d'Internet. Ce type de réseaux permet d'envisager de nombreuses applications comme la domotique, les réseaux de capteurs, les services d'urgence en cas de destruction des infrastructures, la coopération entre des machines de manière spontanée [Perkins 01a]. En outre, cette structure de réseau est souvent présentée comme l'avenir des communications sans fil de par son potentiel [Chlamtac 03].

2.1.3 Synthèse

Aucune solution de communication n'offre à la fois une faible consommation et une grande bande passante. Il convient donc de considérer, dans le cadre de nos applications, des techniques de type WPAN et WLAN et de voir comment elles peuvent cohabiter au sein d'un même réseau. De plus, l'objectif de ces réseaux pour l'agriculture et l'environnement est de pouvoir être facilement mis en oeuvre avec le moins d'infrastructure possible, nous privilégions donc le mode de fonctionnement ad hoc qui autorise une grande souplesse dans le déploiement du réseau, mais en gardant à l'esprit qu'il faut malgré tout atteindre un point d'accès à Internet, donc pouvoir se rattacher à une infrastructure [Lin 00].

Les techniques les plus à même de satisfaire les besoins de nos applications sont le Wi-Fi, pour la portée et la bande passante, et le ZigBee, pour la faible consommation énergétique (voir la Table 2.1). En effet, dans les réseaux agri-environnementaux, il y a des noeuds de différentes natures : des capteurs avec de faibles besoins en bande passante

[16] Liste de points d'accès publics : `http://intel.fr.jiwire.com/`
[17] `http://www.ietf.org/`

	Consommation		Débit max	Fréquence	Portée
	En marche	**En veille**			
Wi-Fi	350 mA		54 Mb/s	2,4 et 5 GHz	500 m
Bluetooth	100 mA	1 mA	1 Mb/s	2,4 GHz	100 m
ZigBee	50 mA à 300 mA	10 µA	250 kb/s	2,4 GHz et 868 MHz	100 m à 1,6 km

Table 2.1 – Les caractéristiques des technologies Wi-Fi, Bluetooth et ZigBee

(envoi de leur mesure), mais de fortes contraintes énergétiques, et des noeuds embarqués sur des véhicules sans contrainte énergétiques, mais avec des besoins en bande passante plus importants (échange de cartes sous forme d'images par exemple). Les réseaux agri-environnementaux doivent donc être multisupports et intégrer ces deux technologies.

Le mode de fonctionnement ad hoc est également privilégié avec la mise en oeuvre d'un protocole de routage de ce type afin d'étendre la couverture du réseau au-delà de la portée radio de point d'accès car, dans ce type de réseaux, la multiplication des points d'accès est impossible pour des questions de coûts et de difficultés d'installation et de maintenance.

La section suivante s'attache à présenter les protocoles de routage existants afin de pouvoir déterminer le plus à même de satisfaire les besoins d'un réseau pour l'agriculture et l'environnement.

2.2 Les protocoles de routage ad hoc

2.2.1 Le principe du routage dans les réseaux ad hoc

Les réseaux ad hoc se caractérisent par une absence d'infrastructure et de gestion centralisée. Dans ce type de réseaux, chaque élément peut bien évidemment émettre et recevoir des messages, mais assure également un rôle de relais de l'information afin que les messages circulent dans le réseau de proche en proche. Chaque noeud du réseau doit donc posséder des capacités de routage, c'est le routage dit ad hoc. Grâce à ce routage, la portée radio d'un noeud peut être virtuellement étendue en utilisant ses voisins comme relais de l'information. Par exemple sur la Figure 2.6, le noeud A peut envoyer des messages au noeud G bien que celui-ci soit hors de portée radio (cercle en pointillé) du noeud A. Pour cela il utilise la route BCFG.

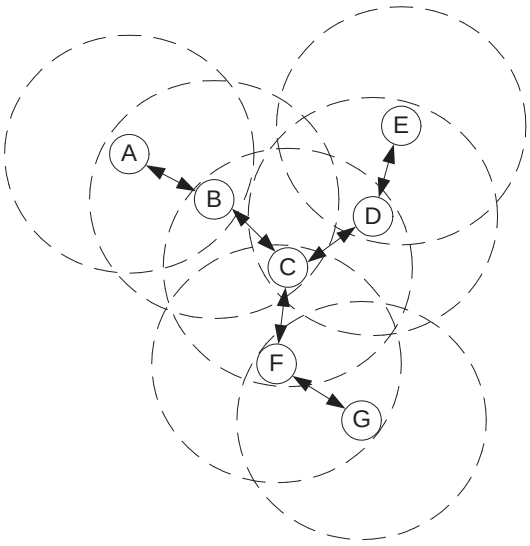

Figure 2.6 – Le principe du routage dans les réseaux ad hoc

La problématique du routage de l'information dans ce type de réseau est complexe. En effet, les réseaux ad hoc sont souvent peu stables :

- les noeuds peuvent être mobiles ;
- les noeuds peuvent entrer et sortir du réseau à tout moment, soit parce qu'ils s'éteignent, soit parce qu'ils sortent de la portée radio de noeuds du réseau ;
- les ressources des noeuds sont souvent limitées (capacité de calcul, énergie...) car ce sont des équipements embarqués légers et mobiles ;
- le médium radio est peu fiable en termes de perte d'information et de sécurité ;
- les liens radio peuvent être asymétriques, l'information passe dans un sens mais pas dans l'autre (à cause des irrégularités des ondes électromagnétiques).

Il existe différentes méthodes pour résoudre cette problématique qui correspondent

à autant de protocoles de routage différents. Classiquement, trois grandes familles de protocoles peuvent être distinguées [Abolhasan 04, Royer 99] : les *proactifs*, les *réactifs* et les *hybrides*. Les protocoles proactifs ou "Table Driven" se comportent comme les protocoles de routage des réseaux filaires : les routes pour atteindre les noeuds du réseau sont maintenues en permanence et stockées dans des tables de routage au niveau des noeuds. Les protocoles réactifs ou "On Demand", quant à eux, ne calculent pas de routage avant qu'il n'y ait une demande par un noeud pour une transmission. Les routes sont donc uniquement cherchées à la demande. Les protocoles hybrides mélangent les techniques des deux précédents.

Avec l'apparition de systèmes de positionnement bas coût, une quatrième catégorie peut être ajoutée aux trois précédentes : elle est basée sur la position des noeuds du réseau, ce sont les *protocoles géographiques* [Stojmenovic 02].

Dans les paragraphes suivants, une présentation non exhaustive des protocoles représentatifs de ces différentes familles est réalisée au travers de leurs principales caractéristiques.

2.2.2 Les protocoles de routage proactifs

Les protocoles de routage proactifs reprennent le principe du routage des réseaux filaires. Ils sont basés sur l'existence de tables de routage au niveau de chacun des noeuds. Lorsqu'un noeud du réseau souhaite envoyer un message, il consulte sa table de routage pour savoir la route à suivre jusqu'au destinataire du message. Le principal avantage de ces protocoles est leur réactivité. En effet, à tout moment chaque élément du réseau connaît un moyen d'atteindre les autres membres du réseau.

En revanche, il faut être capable d'actualiser les tables de routage en permanence pour tenir compte de la mobilité des noeuds, cela entraîne la diffusion de nombreux messages de contrôle qui engendre du trafic sur le réseau réduisant ainsi la bande passante disponible pour envoyer des données. De plus, cette émission permanente de messages entraîne une consommation énergétique plus importante au niveau des noeuds du réseau, ce qui rend l'utilisation de ce type de protocole dans les réseaux de capteurs problématique. Les différents protocoles réactifs se différencient principalement par le mode de mise à jour des tables de routage.

Le protocole OLSR

Le protocole *OLSR (Optimized Link State Routing)* [Clausen 03] est une version adaptée au cas des réseaux sans fil du protocole LSR (Link State Routing) utilisé pour les réseaux filaires, notamment dans le protocole OSPF (Open Shortest Path First) [Moy 98]. Le protocole LSR fonctionne sur le principe d'une inondation globale du réseau par les messages de contrôle : chaque noeud signale à ses voisins périodiquement son état ; les

voisins propagent à leur tour cette information qui envahit le réseau. Cette technique pose malgré tout un problème dans le cas des réseaux sans fil car la bande passante disponible est limitée et un effondrement de la capacité du réseau apparaît rapidement, surtout dans le cas de réseau de grande dimension. Le protocole OLSR améliore le protocole LSR en introduisant la notion de MPR (Multi Point Relay) [Qayyum 00]. Les MPR sont des noeuds élus qui assurent le relais de l'information dans le réseau. Chaque noeud émet la liste de ses voisins mais seuls les noeuds MPR la rediffusent (voir la Figure 2.7). Ce sont les noeuds MPR qui assurent le routage dans le réseau.

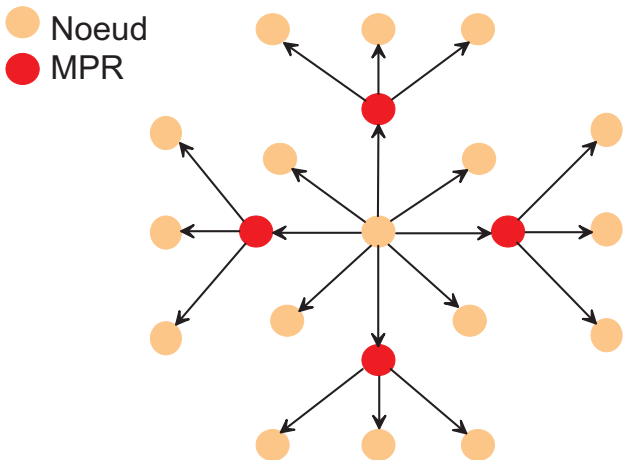

Figure 2.7 – Le principe des noeuds MPR

Le protocole OLSR étant un protocole proactif, il utilise des messages de contrôle périodiques afin d'actualiser les tables de routage. Les deux principaux messages utilisés sont les paquets "Hello" et les paquets TC (Topology Control). Les paquets "Hello" sont envoyés par tous les noeuds et contiennent des informations sur le voisinage des noeuds, ils permettent à chaque noeud de calculer ses MPR. Les paquets TC, quant à eux, contiennent l'information sur les MPR et servent à calculer les tables de routage.

Le protocole OLSR est performant dans les réseaux denses car les MPR permettent de limiter l'inondation du réseau. De plus il est très réactif, chaque noeud sait à tout moment comment atteindre les autres. Par contre, en termes de consommation énergétique, il sollicite beaucoup les noeuds car ils doivent émettre en permanence des messages et c'est en émission que les supports radio consomment le plus : OLSR est difficilement applicable pour des réseaux de capteurs.

Le protocole TBRPF

Le protocole *TBRPF (Topology Broadcast based on Reverse Path Forwarding)* est basé sur une représentation arborescente du réseau [Ogier 04]. Chaque noeud construit un arbre lui permettant d'avoir une route vers tous les noeuds du réseau et ce grâce à

l'algorithme de Dijkstra afin d'avoir les routes les plus courtes en nombre de sauts. En outre, le protocole TBRPF économise de la bande passante en échangeant uniquement les modifications du réseau et non les tables de routage entière. Les messages "Hello" de mise à jour sont donc différentiels et rapportent uniquement les changements dans les voisinages. Cela permet en outre des économies de ressources.

La Figure 2.8 montre un exemple d'arborescence avec un réseau de vingt noeuds : quatre noeuds sont des sommets d'arbre (en rouge) et les autres sont des feuilles. Si le noeud u génère un message, seuls les noeuds rouges qui ne sont pas des feuilles propagent l'information.

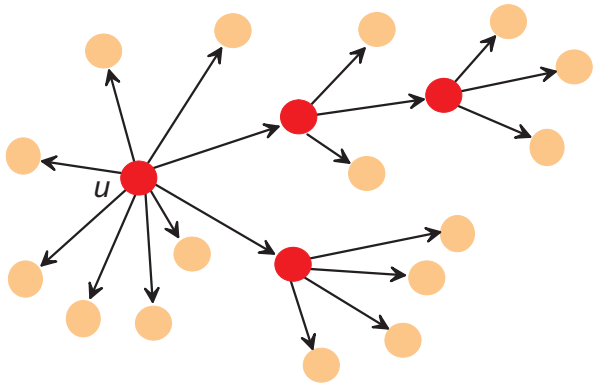

Figure 2.8 – Le principe de l'arborescence dans le protocole TBRPF d'après [Ogier 00]

Le protocole DSDV

Le protocole *DSDV (Dynamic destination-Sequenced Distance-Vector)* [Perkins 01b] est basé sur l'algorithme distribué de Bellman-Ford qui utilise les vecteurs de distance. Dans ce cas, la métrique utilisée est le nombre de sauts. La Figure 2.9 page suivante montre un exemple de réseau ayant comme métrique le nombre de sauts. Les routes choisies sont celles présentant le moins de sauts. Chaque noeud du réseau maintient une table de routage à jour comportant tous les noeuds du réseau joignables, le noeud intermédiaire suivant sur la route, le nombre de sauts, et le numéro de séquence de la destination. La Table 2.2 représente la table de routage du noeud D du réseau de la Figure 2.9. Le numéro de séquence permet d'éviter les phénomènes de boucle en ne conservant que l'information la plus récente (numéro de séquence le plus élevé). Les tables de routage sont mises à jour périodiquement mais également lors d'événements particuliers (la découverte d'une route invalide, la mobilité d'un noeud...). Sur des réseaux de grande dimension, la mise à jour des tables en cas de mobilité des noeuds peut être lente car elle est initiée par la destination.

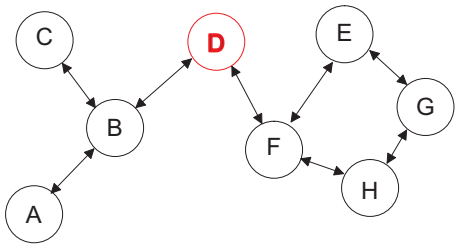

Figure 2.9 – Un exemple de réseau utilisant le protocole DSDV d'après [Perkins 01b]

Destination	Saut suivant	Métrique	Séquence
D	**D**	**0**	**S406_D**
A	B	2	S128_A
B	B	1	S564_B
C	B	2	S710_C
E	F	2	S392_E
F	F	1	S076_F
G	F	3	S128_G
H	F	2	S050_H

Table 2.2 – Un exemple de table de routage d'un noeud de réseau DSDV d'après [Perkins 01b]

Le protocole GSR

Le protocole *GSR (Global State Routing)* [Chen 98] est un mélange de DSDV et de LSR. Il utilise l'état des liens, mais les noeuds échangent uniquement des informations avec leurs voisins afin de ne pas inonder le réseau. Le calcul des routes se fait en utilisant l'algorithme de Dijkistra pour trouver le chemin le plus court entre la source et la destination à partir des tables d'état des liens.

Le protocole FSR

Le protocole *FSR (Fisheye State Routing)* [Pei 00] est une amélioration du protocole GSR, car il prend en compte le nombre de sauts entre les noeuds pour ajuster la fréquence d'émission des messages de contrôle : plus un noeud est proche d'un autre, plus les fréquences d'émission sont élevées ; un noeud a une meilleure connaissance de son voisinage immédiat. La Figure 2.10 montre le principe des différentes zones pour le noeud du centre en jaune. Ainsi le trafic de contrôle sur le réseau est diminué de manière conséquente.

2.2.3 Les protocoles de routage réactifs

Les protocoles de routage réactifs ne maintiennent pas en permanence des tables de routage de l'ensemble du réseau. Lorsqu'un noeud a besoin d'envoyer un message vers un

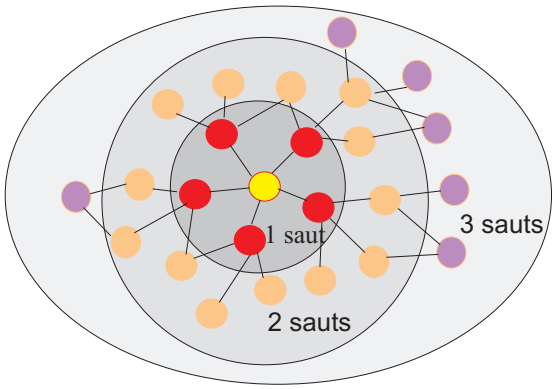

Figure 2.10 – Le principe des zones en fonction du nombre de sauts dans le protocole FSR d'après [Pei 00]

autre élément du réseau, il commence par déterminer une route lui permettant d'atteindre le destinataire du message. Cette route sert à envoyer les informations et reste dans une table au niveau du noeud. Les noeuds du réseau n'ont donc qu'une vision partielle du réseau et ne connaissent que les autres éléments du réseau avec qui ils ont l'habitude de communiquer. Les routes étant déterminées à la demande, ce mode de fonctionnement permet de réduire le nombre des messages de contrôle, mais engendre des temps de latence lorsqu'un noeud veut envoyer pour la première fois un message vers un autre noeud ou si la route en mémoire n'est plus valide.

Le protocole DSR

Le protocole *DSR (Dynamic Routing Source)* [Johnson 02] est un protocole réactif qui s'appuie sur deux sortes de paquets. Lorsqu'un noeud veut émettre un message, il fait une demande de route au moyen d'un paquet RREQ (Route REQuest) envoyé au destinataire. Ce paquet est propagé dans le réseau jusqu'à atteindre le destinataire, chaque station retransmettant le paquet modifié en inscrivant son adresse dans le champ actualisant ainsi la route prise par le paquet. Lorsque le destinataire reçoit le paquet RREQ, il répond à la source avec un paquet RREP (Route REPly) lui indiquant la route pour l'atteindre. La Figure 2.11 illustre le principe de découverte d'une route entre le noeud A et le noeud G. Il peut malgré tout y avoir des problèmes en cas de lien asymétrique et des problèmes d'irrégularités au niveau des ondes électromagnétiques, la route de retour n'étant pas forcement possible.

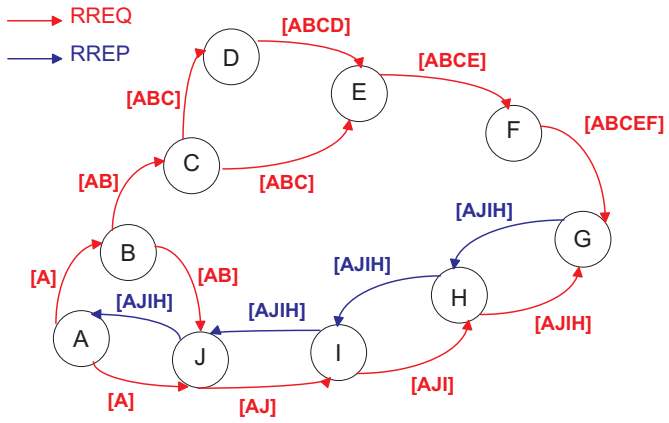

Figure 2.11 – Le principe de découverte de route dans le protocole DSR

Il existe également une procédure de maintien des routes permettant à chaque noeud découvrant une erreur d'émettre un message. Les routes découvertes sont gardées en mémoire par les stations afin d'avoir une meilleure réactivité, mais au détriment de la validité des routes dans le cas de noeuds très mobiles.

Le protocole ABR

Le protocole *ABR (Associativity-Based Routing)* [Toh 96] est un protocole réactif qui choisit les routes en fonction de la stabilité temporelle des liens entre les noeuds. Chaque noeud détermine l'état des liens avec ses voisins immédiats en émettant périodiquement un "Beacon", c'est-à-dire des messages "Hello". Suivant l'ancienneté du dernier message reçu, un noeud peut établir une hiérarchie entre ses voisins : stable ou instable. Cette notion de stabilité des noeuds est très intéressante car elle permet d'avoir un comportement différencié suivant ses voisins : par exemple, pour un réseau de capteurs où la mobilité est quasi nulle, la stabilité des liens est très grande. Le routage peut donc diminuer de manière importante les fréquences d'émission des messages de contrôle et par conséquent diminuer la consommation énergétique des noeuds.

Le protocole ABR étant réactif, le mécanisme de recherche de route s'effectue lorsqu'un noeud veut envoyer un message vers un autre et qu'il ne l'a pas déjà fait car, dans ce cas, il a la route en cache. Le principe est le même que pour le protocole DSR. La source envoie un message de recherche de route par inondation (flooding) dans le réseau, chaque noeud ne réémet qu'une fois le message. Chaque noeud ajoute au paquet son identifiant et l'état du lien par lequel le message a transité afin de constituer la route. Lorsque la destination reçoit le message de recherche de route, elle attend l'arrivée éventuelle d'autres messages de recherche de route afin de choisir la route la plus stable. Elle renvoie à la source la route par le chemin le plus stable. La Figure 2.12 illustre la route retenue entre A et N est la route B-D-I-N. Le noeud N dans son message RREP indique cette route au noeud A car c'est la plus stable. Le protocole ABR ajoute également des mécanismes de maintien

afin de détecter les routes détruites.

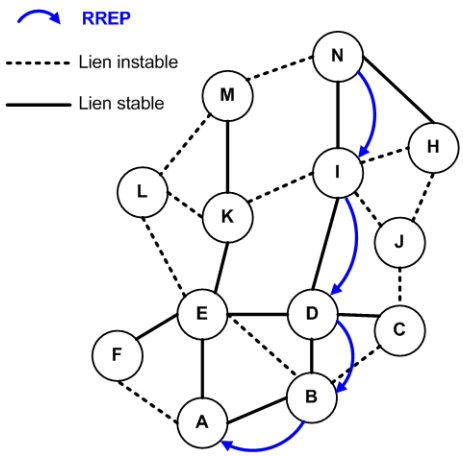

Figure 2.12 – Les différents types de liens dans le protocole ABR

Le protocole AODV

Le protocole *AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector routing)* [Perkins 03] reprend les principes du protocole DSR pour la recherche des routes, mais afin de limiter le trafic, il diminue la taille des paquets en n'incluant pas toute la route au niveau de ceux-ci. Ce sont les noeuds intermédiaires qui stockent les routes au niveau de la table de routage. Lors de la réponse à une demande de route, le paquet utilise ces tables pour revenir à la source de la demande. Ces tables sont en cache et peuvent accélérer ainsi la découverte d'une route. Des messages "Hello" sont également utilisés afin de connaître la validité des liens.

2.2.4 Les protocoles de routage hybrides

Les protocoles dits hybrides ont un fonctionnement moins caractéristique que les deux précédents types. Ils peuvent voir leur comportement varier suivant les liens entre les noeuds du réseau, la position des noeuds dans le réseau ou l'état de fonctionnement du noeud en termes de capacité énergétique par exemple.

Le protocole ZRP

Le protocole *ZRP (Zone Routing Protocol)* [Haas 02d] utilise en fait deux protocoles de routage, un proactif et un réactif. Une taille de zone en nombre de sauts est définie, par exemple 2, comme sur la Figure 2.13. Les noeuds présents dans la zone A à 2 sauts sont gérés suivant un protocole proactif : le protocole *IARP (IntrAzone Routing Protocol)*

[Haas 02c]. Les paquets de contrôle possèdent une durée de vie en nombre de sauts ; lorsqu'un noeud reçoit un paquet de contrôle, il actualise sa table de routage et il retransmet le paquet en décrémentant la durée de vie du paquet. Lorsque la durée de vie du paquet de contrôle est nulle, la bordure de zone est atteinte et le paquet n'est plus retransmis. Les noeuds hors de la zone A sont atteints grâce à un protocole réactif : le protocole *IERP (IntErzone Routing Protocol)* [Haas 02b]. Un troisième protocole gère les transitions entre les deux précédents : le protocole *BRP (Border Resolution Protocol)* [Haas 02a].

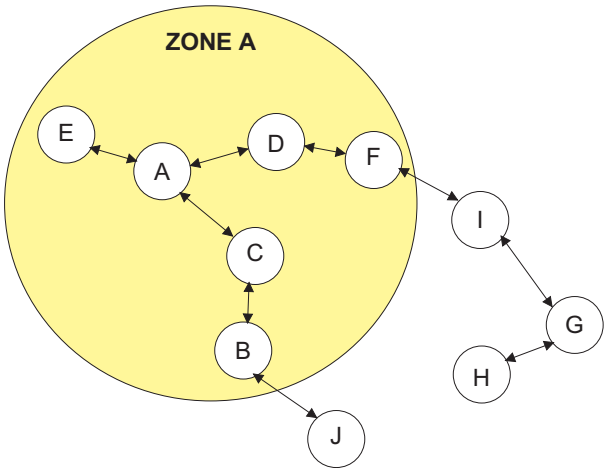

Figure 2.13 – Le principe des zones dans le protocole ZRP

Le fait de considérer différentes zones dans le réseau est très intéressant, car un noeud peut ainsi adapter son comportement en fonction de la distance qui le sépare de ses voisins. Un noeud a plus d'interactions avec ses voisins proches qu'avec ceux plus éloignés. En revanche, dans le cas de ZRP, la mise en oeuvre au niveau du noeud est plus complexe que pour les autres protocoles : un noeud exécute en fait trois protocoles de routage et cela peut être préjudiciable à ses ressources CPU et mémoire.

Le protocole CBRP

Comme son nom l'indique, le protocole *CBRP (Cluster Based Routing Protocol)* est basé sur la création de groupes (clusters) au sein du réseau [Jiang 99]. Les noeuds peuvent se voir attribuer des rôles particuliers au sein du réseau grâce à l'échange de message "Hello". Un noeud peut être élu chef de groupe (cluster-head), ou passerelle (gateway) entre groupes (voir la Figure 2.14) suivant sa situation dans le réseau, principalement sa visibilité des autres noeuds. Les routes sont établies à la demande, comme pour un protocole réactif mais uniquement par les chefs de groupe : si un noeud veut envoyer un message, il demande à son responsable de groupe de lui déterminer la route à suivre. La route trouvée est agrégée au fur et à mesure du message de découverte et le noeud destinataire connaît ainsi le chemin de retour.

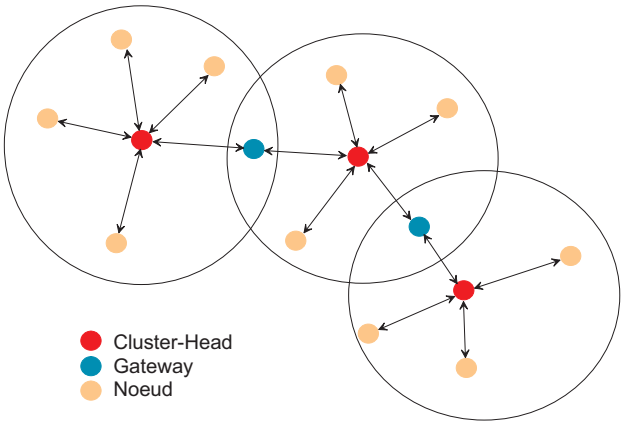

Figure 2.14 – Les différents types de noeuds dans le protocole CBRP

L'idée de cluster est pertinente pour les réseaux agri-environnementaux car les différents noeuds peuvent être rassemblés suivant leur fonction ou leur situation géographique (les capteurs d'une parcelle par exemple). Les passerelles entre clusters doivent être choisies judicieusement car ce rôle est gourmand en ressources et les noeuds assurant cette fonction doivent être correctement dimensionnés.

Le protocole EADSR

Le protocole *EADSR (Energy Aware Dynamic Source Routing)* [Doshi 02] est basé sur le protocole DSR (voir page 33) auquel est adjoint un modèle de consommation d'énergie basé sur la puissance consommée par un noeud pour émettre un message en fonction notamment de la distance entre noeuds (voir la Figure 2.15). Les routes sont choisies en minimisant la consommation énergétique de chacun des noeuds : les petites distances d'émission sont privilégiées, quitte à augmenter le nombre de sauts.

Cette idée est bonne sur le plan théorique, mais la consommation énergétique lors de l'émission dépend également du milieu dans lequel se trouve les noeuds et un modèle énergétique uniquement basé sur la distance entre noeuds est peu représentatif de la réalité de la propagation des ondes électromagnétiques [Rappaport 02].

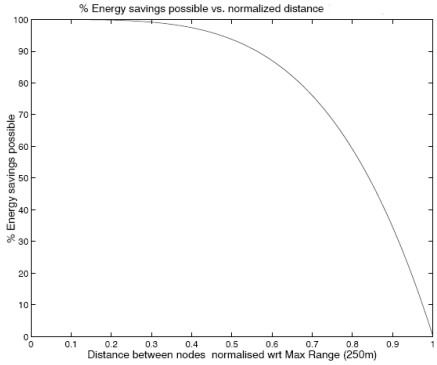

Figure 2.15 – Le modèle énergétique utilisé par le protocole EADSR [Scriptor 99]

2.2.5 Les protocoles de routage géographiques

Les protocoles de routage géographiques se différencient de ceux précédemment présentés par l'utilisation d'une donnée supplémentaire dans la recherche des routes : la position géographique des noeuds du réseau. Cette position peut être obtenue de différentes façons :

- par l'utilisation d'un récepteur GPS au niveau de chaque noeud du réseau [Ergen 02, Ko 97],
- par l'utilisation d'un récepteur GPS pour seulement quelques noeuds du réseau afin d'optimiser la recherche des routes dans les protocoles classiques [Ermel 02],
- par l'utilisation du signal radio pour localiser les noeuds par triangulation par rapport à des points de référence [Bulusu 00].

Dans le cas des applications agri-environnementales, les mobiles sont équipés de GPS ou les capteurs sont placés à des positions géographiques connues ; nous allons donc plus particulièrement présenter le principe des protocoles utilisant des GPS.

Le protocole DREAM

Le protocole de routage *DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility)* est conceptuellement proche des protocoles de routage proactifs [Basagni 98]. Chaque noeud du réseau dispose d'une table des positions qui peut être assimilée aux tables de routage des noeuds utilisées par un protocole proactif. Dans cette table de position, est maintenue à jour la position des autres mobiles dans le réseau, ainsi que leur vitesse et l'instant de mise à jour de ces informations. La fréquence de mise à jour des informations pour un mobile dépend de deux paramètres : d'une part de son éloignement par rapport au noeud mettant à jour sa table, et d'autre part de sa mobilité, c'est-à-dire s'il se déplace plus ou moins rapidement. En effet, plus des noeuds sont distants, moins leur déplacement relatif est important, mais la route est moins stable car il y a beaucoup de sauts entre eux. De même, plus un noeud est mobile, plus les informations le concernant doivent être actualisées. La prise en compte de ces deux paramètres permet de réduire le trafic de

contrôle par rapport à un protocole réactif pur. Les paquets de mise à jour ont donc des fréquences d'émission variables suivant la localisation relative d'un noeud et sa mobilité.

Un noeud mobile A pour déterminer la route à suivre pour atteindre un noeud mobile J utilise sa table de position (voir la Figure 2.16). Dans sa table, il possède la localisation de J à l'instant t_1 ainsi que sa vitesse v_J, A peut donc en déduire une position probable de J à l'instant présent (t_2). En effet, J se trouve probablement dans un cercle de rayon $v_J(t_2 - t_1)$. Le mobile A détermine ensuite un cône dont il est le sommet et donc la zone probable de présence de J est la base. Le mobile A envoie ensuite les informations à transmettre à tous les noeuds inclus dans le cône qui retransmettent jusqu'à atteindre J. A chaque retransmission, la route est mise à jour dans le paquet afin que J connaisse le chemin de retour pour les messages de retour comme les acquittements de trame. Si plusieurs chemins sont possibles, J choisit par exemple celui comportant le moins de sauts. Le protocole DREAM doit malgré tout avoir un second protocole de secours dans le cas où il n'y a pas de noeuds présents dans le cône, mais où il existe une route moins directe à l'extérieur du cône, dans ce cas on utilise le flooding sur l'ensemble du réseau. Dans le cas de DREAM, les paquets de recherche de route, contiennent aussi des données.

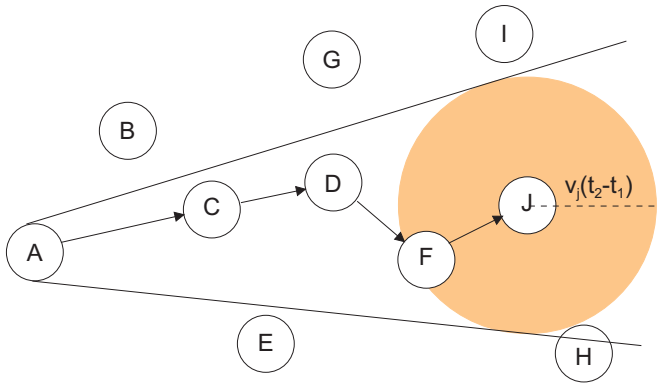

Figure 2.16 – Le principe de recherche de route dans le protocole DREAM

Le protocole LAR

Le protocole de routage *LAR (Location-Aided Routing)* existe sous deux formes : LAR1 et LAR2 [Ko 00]. Dans les deux cas, ce sont des protocoles de type réactifs, c'est-à-dire qu'il y a une phase de recherche de route avant l'envoi de l'information.

La variante LAR1 procède un peu comme le protocole DREAM, c'est-à-dire qu'elle recherche les routes dans une zone calculée à partir de la position de la source et de la destination : dans ce cas, ce n'est pas un cône qui est utilisé mais le plus petit rectangle incluant la source et la zone de localisation probable de la destination (voir la Figure 2.17).

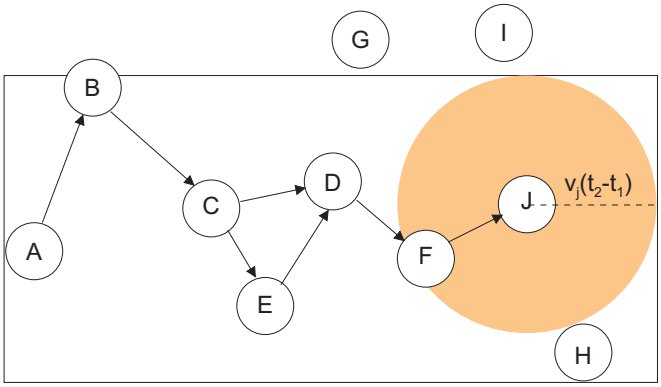

Figure 2.17 – Le principe de recherche de route dans le protocole LAR1

La source envoie alors des paquets de recherche de route vers ses voisins inclus dans le rectangle, ceux-ci réalisent alors la même opération avec un rectangle plus petit les incluant comme nouvelle source et incluant la destination. Ainsi, de proche en proche, la route est construite en réduisant la zone d'investigation. Une fois la route déterminée, les informations peuvent être envoyées.

La version LAR2 ne repose pas sur la détermination de zone de recherche, mais sur le choix du plus court chemin en termes de distance entre la source et la destination. Chaque noeud envoie l'information de recherche de route vers son voisin le plus proche (en distance) de la destination finale. Par exemple, sur la Figure 2.18, le noeud A envoie un message de recherche de route vers le noeud B car $Dist_B < Dist_A$, où $Dist_i$ est la distance séparant le noeud i de la destination. Chaque noeud retransmet un message de recherche de route vers ses voisins plus près que lui de la destination J (le noeud C envoie vers E et D car ils sont tous les deux plus près de J). Le trafic de recherche de route est ainsi très réduit. Une fois une route obtenue, elle est utilisée pour acheminer les informations à transmettre.

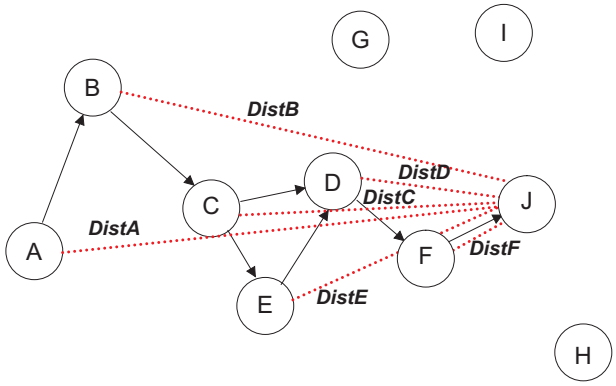

Figure 2.18 – Le principe de recherche de route dans le protocole LAR2

Le protocole LAR2 peut être amélioré en prenant en compte le contexte des noeuds et en introduisant la présence des obstacles. En effet, la route la plus courte en termes de distance n'est pas forcément pertinente si un obstacle est présent sur cette route et l'utilisation de routes plus longues en distance mais opérationnelles du point de vue des liaisons radios peut être envisagée [De Sousa 05].

Le protocole GPSR

Le protocole de routage *GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)* [Karp 00] est proche dans l'esprit de LAR2. Ce protocole détermine la route à suivre en minimisant les distances entre les noeuds et la destination tout comme LAR2 (c'est le mode "Greeding Packet Forwarding"), mais un second mécanisme est mis en oeuvre en cas de blocage (c'est le mode "Perimeter"). Dans ce cas, le noeud n'ayant pas de voisin plus proche (en distance) que lui de la destination passe le relais à ses voisins qui eux peuvent avoir un voisin plus proche de la destination (en distance). Sur la Figure 2.19, le noeud B utilise le mode "Perimeter" car il n'a pas de voisin plus proche en distance de la destination finale G, ce qui permet de trouver une route passant par le noeud C qui, lui, peut à nouveau utiliser le mode "Greeding Packet Forwarding" ayant un voisin plus proche de G (en l'occurrence D).

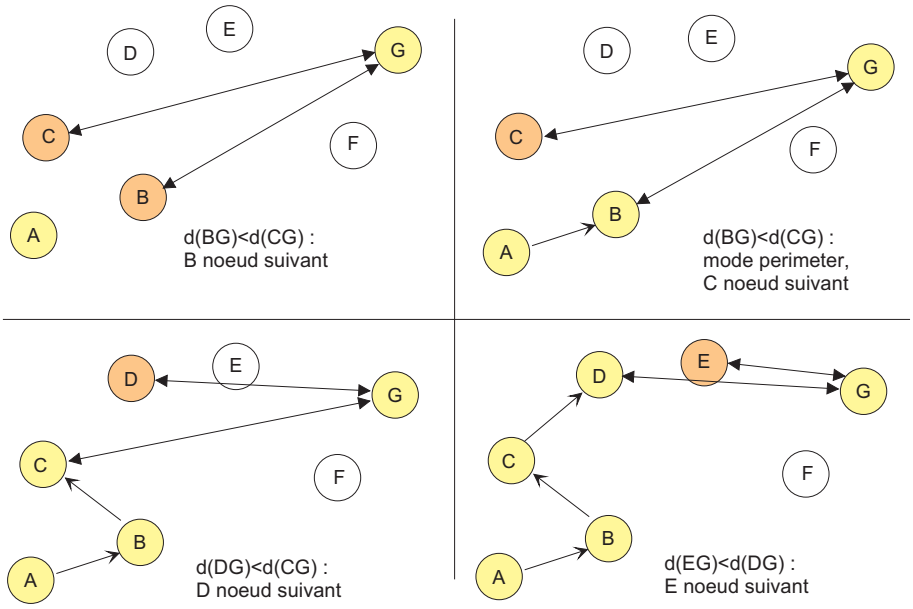

Figure 2.19 – Le principe de recherche de route dans le protocole GPSR

2.2.6 Synthèse

Comme nous l'avons vu, il existe donc quatre catégories de protocole de routage : les proactifs, les réactifs, les hybrides et les géographiques. La Figure 2.20 présente sous forme schématique les principaux protocoles qui ont été présentés.

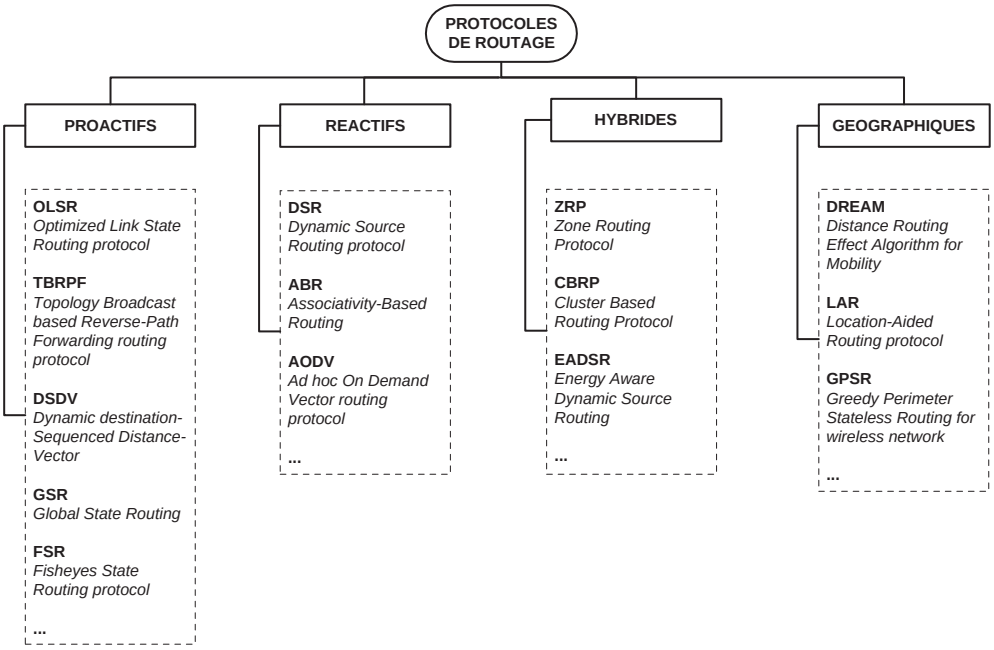

Figure 2.20 – Les protocoles de routage ad hoc

Les protocoles proactifs ont une très bonne réactivité car les noeuds possèdent en permanence, au sein de tables de routage, les routes pour atteindre tous les noeuds du réseau, mais cela se fait au détriment de la capacité d'échange du réseau, car les messages de contrôle sont nombreux et limitent donc la bande passante disponible pour les données. Ces protocoles sont donc plutôt adaptés aux réseaux de taille moyenne mais pouvant présenter une mobilité importante et nécessitant une forte réactivité.

Les protocoles réactifs, quant à eux, souffrent d'un temps de latence avant l'envoi des données car il faut établir une route entre la source et la destination. En revanche, ils utilisent peu de trafic de contrôle et, en conséquent, ils pénalisent moins la capacité d'échange du réseau. Ce type de protocoles est donc bien adapté au grand réseau mais est pénalisé par des noeuds à forte mobilité car les routes changent en permanence, ce qui induit de fréquentes recherches de route et des temps de latence importants dans le réseau. Ces protocoles sont donc plutôt destinés à des réseaux ayant un grand nombre de noeuds mais avec une mobilité relativement faible.

Les protocoles hybrides essayent de combiner les avantages des protocoles proactifs et

réactifs en introduisant de nouvelles notions dans la politique de routage comme l'éloignement relatif des noeuds, les possibilités en termes de ressource des noeuds... Mais, plus la complexité du routage augmente, plus des ressources au niveau des noeuds sont mobilisées et plus des temps de retard dans l'émission des données sont introduits. Dans un réseau ad hoc, la fonctionnalité de routage pour les noeuds est une tâche qui ne doit pas être pénalisante et qui ne doit donc pas leur nécessiter beaucoup de ressources ; il faut donc trouver un compromis entre optimisation de la fonction routage, charge de travail des noeuds pour réaliser cette fonction et consommation énergétique et mémoire.

Les protocoles géographiques optimisent le routage en introduisant la position du noeud et éventuellement sa vitesse. Ces nouvelles données sont très pertinentes pour optimiser la recherche d'un meilleur chemin entre la source et la destination, mais ne sont pas forcément adaptées à tous les types de réseaux. En effet, ces protocoles supposent que le noeud dispose d'un moyen de connaître sa position, tel qu'un GPS, ce qui n'est pas toujours possible. En revanche, dans le cas de réseau de véhicules, ce type de protocoles semble plutôt bien adapté.

Un protocole idéal pour les réseaux agri-environnementaux doit limiter le nombre de messages de contrôle afin de réduire la consommation énergétique des noeuds. Il doit être suffisamment réactif vis-à-vis des noeuds qui dialoguent fréquemment entre eux : ceux-ci doivent avoir une table de routage de leurs voisins proches, mais cette table de routage doit être de taille réduite afin de ne pas pénaliser la ressource mémoire de noeuds de type capteur. Lorsque qu'un noeud doit découvrir une nouvelle route, il faut limiter l'inondation du réseau afin de préserver la bande passante et de restreindre le nombre de noeuds mis en oeuvre (économie d'énergie oblige). Pour cela, l'utilisation de la dimension géographique semble pertinente mais de manière limitée afin de ne pas engendrer de nombreux calculs, gourmands en termes de ressources, au niveau des noeuds.

Nous constatons dans la Table 2.3 que chaque famille de protocole de routage est plus ou moins adaptée à un type de réseau. Il convient donc de définir précisément les caractéristiques du réseau (taille, mobilité des noeuds, ressources des noeuds, volume d'information à échanger...) afin de bien choisir un protocole de routage adapté.

Maintenant ce pose la question de l'adéquation des protocoles de routage présentés avec le contexte des réseaux agri-environnementaux.

Protocoles	**Avantages**	**Inconvénients**
Proactifs	Pas de temps de réaction Adaptés aux réseaux denses de taille moyenne Adaptés aux réseaux à forte mobilité	Trafic de contrôle important Capacité d'échange du réseau limitée Consommation énergétique plus importante
Réactifs	Trafic de contrôle faible Adaptés aux grands réseaux Consommation énergétique réduite	Temps de réaction long Problème en cas de forte mobilité des noeuds
Hybrides	Adaptables aux réseaux Consommation énergétique réduite	Recherche des routes complexes Temps de réaction long Ressources CPU et mémoire
Géographiques	Position des noeuds connue Limitation du trafic	Utilisation d'un GPS Ressources CPU et mémoire

Table 2.3 – Les avantages et inconvénients des différentes catégories de protocoles de routage

2.3 Le routage dans les réseaux agri-environnementaux

2.3.1 Un comparatif des protocoles existants

Afin de pouvoir comparer les différents protocoles, il faut prendre en compte différents critères [Corson 99] tels que :

- des propriétés qualitatives comme l'absence de boucles ("loop free"), l'adaptation de l'algorithme de routage au trafic, la mise en sommeil des noeuds,
- des métriques quantitatives telles que le délai de bout en bout, la bande passante, le temps de découverte des routes,
- des indicateurs de la performance du routage comme le rapport entre le nombre de bits de contrôle et le nombre de bits de données par exemple,
- le contexte du réseau comme le nombre de noeuds, leur mobilité, l'évolution de la topologie du réseau.

Cette multiplicité des critères ne rend pas la tâche facile et peut entraîner une certaine subjectivité des résultats des comparatifs. Malgré tout, il existe différents travaux dans la littérature essayant de comparer les protocoles de routage [Broch 98, Das 98, Royer 99].

Tout d'abord, ces études montrent que la performance des protocoles est largement influencée par le scénario retenu pour l'étude. En effet en fonction du nombre de noeuds, de leur modèle de mobilité, de leur vitesse, du nombre de messages envoyés, etc., les performances de tel ou tel protocole sont plus ou moins bien mises en valeur [Broch 98]. Par exemple, P. Johansson et al. montrent dans [Johansson 99], au travers de trois scénarios différents (salle de conférence avec peu de mobilité, couverture d'un événement avec une forte mobilité et zone de catastrophe avec une mobilité hétérogène entre les noeuds) que les performances de trois protocoles de routage (DSDV, DSR, AODV) peuvent varier énormément en fonction des situations : des variations de performances d'un facteur trois sont constatées par les auteurs pour le protocole DSDV en fonction des scénarios.

Les différents comparatifs sont la plupart du temps réalisés sur un simulateur, comme par exemple NS-2[18] ou OPNET[19]. Cela ne permet pas de prendre en compte de manière fidèle l'influence de la propagation des ondes ou les problèmes liés au médium radio sur la robustesse du protocole de routage et, ce, bien que des recherches soient menées pour améliorer les modèles de propagation des simulateurs [Broch 98]. Des travaux commencent d'ailleurs à valider des méthodologies d'expérimentation en réel afin de bien appréhender les phénomènes liés à la communication [Lundgren 05]. Car comme le montrent Gauthier et al. [Gauthier 05], la prise en compte des interférences radios a une forte influence sur les analyses des performances du routage.

Il est donc très difficile de comparer des protocoles de routage. Par exemple, dans le cas de OLSR et AODV, Hsu et al. [Hsu 03] concluent que AODV est le plus performant ;

[18] `http://www.isi.edu/nsnam/ns/`
[19] `http://www.opnet.com/`

tandis que Gauthier et al. [Gauthier 05] affirment que OLSR "surpasse" le protocole AODV. Bien évidemment, les deux résultats sont corrects et dépendent uniquement du réseau observé et des paramètres pris en compte pour effectuer la comparaison.

En fait, il faut un protocole spécialement conçu pour les caractéristiques d'un type de réseau ad hoc [Johansson 99]. Malgré tout, les caractéristiques de base des protocoles les prédestinent à certains types de réseaux [Huhtonen 04, Johansson 99] :

- les protocoles proactifs pour les réseaux avec beaucoup de noeuds, relativement stables et ayant un trafic plutôt sporadique ;
- les protocoles réactifs pour les réseaux avec un nombre restreint de noeuds, des noeuds mobiles et un trafic continu.

Afin d'obtenir de bonnes performances, il faut donc partir des besoins et des caractéristiques du réseau et définir le protocole de routage le mieux adapté. C'est l'objet du paragraphe suivant.

2.3.2 La nécessité d'un nouveau protocole

Le choix d'un protocole de routage pour les réseaux agri-environnementaux n'est pas évident au regard de leurs caractéristiques (voir 1.2 page 12).

En effet, le trafic dans ce type de réseaux est plutôt sporadique. La topologie est relativement stable, les noeuds mobiles ayant des vitesses relativement faibles. Le nombre de noeuds est également restreint. Avec ces constatations, le protocole de routage le plus adapté semble être à la fois proactif et réactif, il est donc *hybride*.

Dans les études de performances des protocoles existants, les réseaux considérés sont toujours de type ad hoc pur [Das 98]. Or, dans le cas des réseaux pour l'agriculture et l'environnement, il y a un mélange entre le mode *ad hoc* et le mode *infrastructure*. Les données collectées sont centralisées vers un point de l'infrastructure (par exemple l'exploitation agricole). Il faut donc que le protocole de routage prenne en charge ce lien entre les deux modes de manière transparente.

La position des noeuds des réseaux agri-environnementaux est connue car ils font des mesures et des opérations géoréférencées : soient les noeuds sont fixes et donc placés à des points de position connue, soient ils sont mobiles et dans ce cas équipés d'un GPS. L'utilisation d'un protocole de routage de type *géographique* est donc tout à fait envisageable pour acheminer les messages dans ce type de réseaux.

La notion de consommation énergétique est également une dimension à prendre en compte dans ces réseaux, car certains des noeuds sont des capteurs à faibles ressources énergétiques, par conséquent il ne faut pas que le protocole de routage *consomme trop*.

Comme cela a également été exposé précédemment, les réseaux agri-environnementaux peuvent se découper en groupes de noeuds de même nature ou d'intérêts communs (un

RCSF sur une parcelle, des véhicules exécutant un chantier de récolte...). Ces groupes doivent pouvoir être adressés de manière globale, le protocole de routage doit donc supporter une forme de *multicast*.

Bien entendu, le protocole de routage doit être à même d'assurer la *QoS* au sein du réseau et ce malgré la grande hétérogénéité de celui-ci.

En résumé, un protocole de routage pour les réseaux agri-environnementaux doit être :
- de type hybride,
- mixte ad hoc/infrastructure,
- géographique,
- peu gourmand en énergie,
- capable de supporter le multicast,
- à même de garantir la QoS.

Un tel protocole de routage n'existe pas à l'heure actuelle et les fonctionnalités qu'il doit avoir correspondent aux principaux challenges que doivent relever les futurs protocoles de routage [Royer 99]. Mais ces challenges sont ici réduits au domaine des applications agricoles et environnementales. Il convient donc de définir un nouveau protocole de routage adapté à ce type de réseaux. Ce protocole a été baptisé : protocole de Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative (CIVIC).

En outre la conception de ce protocole de routage se doit d'être étroitement lié aux contraintes notamment énergétiques des noeuds d'un réseau agri-environnemental. Le chapitre 3 présente donc également l'intégration matérielle du protocole : embedded-CIVIC (e-CIVIC). L'approche proposée est complètement intégrée : logicielle et matérielle, afin de prendre en compte toutes les contraintes telles que la robustesse, l'encombrement, la tolérance aux pannes et le coût.

⋆⋆⋆⋆⋆⋆⋆

Chapitre 3

Un nouveau protocole pour de nouveaux réseaux

"Combien la rage de dire des choses nouvelles a-t-elle fait dire de choses extravagantes."
Voltaire, *Dictionnaire philosophique*

Sommaire

3.1 Le protocole de Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative (CIVIC) 50
3.2 La description détaillée de CIVIC 56
3.2.1 Le format des paquets dans CIVIC 57
3.2.2 Le fonctionnement de CIVIC 61
3.2.3 La structure de la pile CIVIC 66
3.3 L'intégration de CIVIC : embedded-CIVIC 67
3.3.1 Le concept d'architecture multicomposants 67
3.3.2 Le micro noyau temps réel LIMOS 69
3.3.3 La structure d'e-CIVIC 71

Des exemples de différents protocoles de routage existants ont été présentés et il est apparu que leurs caractéristiques ne permettent pas de répondre aux contraintes des réseaux agri-environnementaux. La définition d'un nouveau protocole prenant en compte les spécificités de ces réseaux est donc nécessaire.

Ce chapitre est consacré à la présentation du nouveau protocole de CIVIC et de son implémentation matérielle e-CIVIC. Ces deux dimensions (logicielle et matérielle) sont étroitement liées car le logiciel prend en compte les contraintes d'intégration, notamment en terme énergétique, ou de consommation de ressources.

3.1 Le protocole de Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative (CIVIC)

Le protocole CIVIC est, comme son nom l'indique, un protocole dédié à l'échange d'informations entre véhicules. En effet, cette thèse avait initialement pour objectif la communication entre les machines agricoles et plus généralement entre les véhicules en milieu naturel, d'où le nom de CIVIC [Chanet 03]. Elle a été ensuite étendue aux réseaux agri-environnementaux car ce protocole peut tout à fait s'appliquer à de tels réseaux [Hou 05]. Ainsi, CIVIC est transposable aux réseaux dont certains paramètres sont connus a priori comme la distribution géographique des noeuds (sur des parcelles par exemple), la position géographique des infrastructures, ou peuvent être obtenus comme la vitesse des noeuds mobiles : c'est le cas des réseaux de communication inter véhicules et des réseaux agri-environnementaux.

Le protocole CIVIC (voir la Figure 3.1) est dans l'esprit proche du protocole ZRP (voir page 35) : suivant la position relative des noeuds (en nombre de sauts), le protocole se comporte différemment. Les principales caractéristiques sont listées ci-dessous [Chanet 06c].

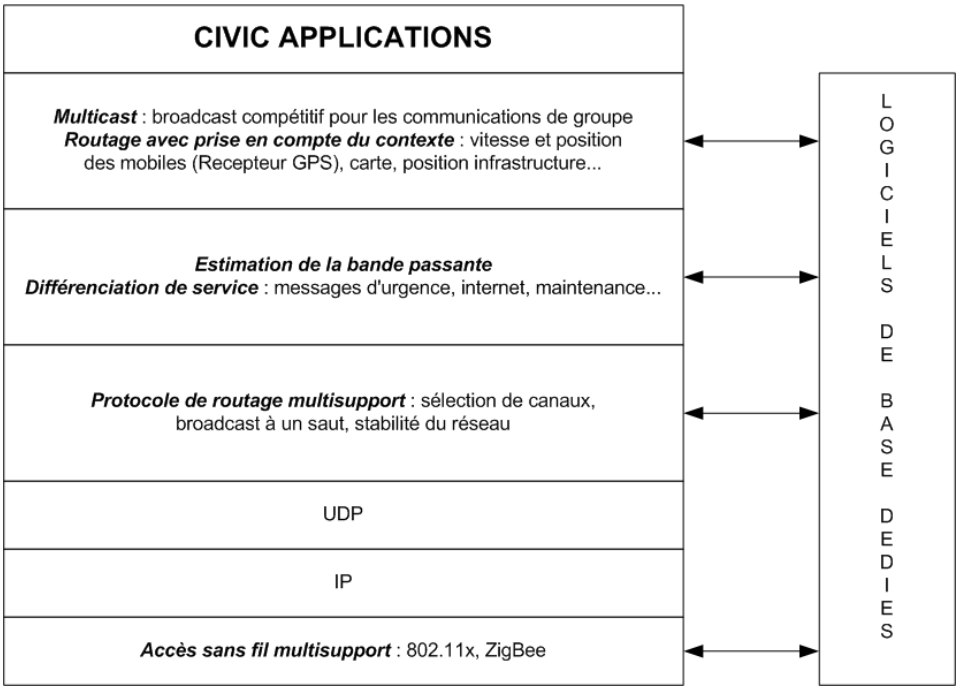

Figure 3.1 – Les principales caractéristiques du protocole de routage CIVIC

Le multisupport

Dans CIVIC, deux médiums de communication au moins sont utilisés afin d'augmenter la robustesse et la QoS. Les médiums préférentiellement utilisés sont le ZigBee et le IEEE 802.11x. Des noeuds avec un seul support de communication peuvent être également intégrés au réseau pour réduire leur consommation et leur coût.

L'utilisation du multisupport permet d'avoir différentes solutions pour envoyer des données en fonction de leur volume, de l'importance de l'information, du rapport entre la consommation énergétique et le volume de données à transmettre.

Les médiums mettent en jeu des antennes adaptées aux conditions d'émission et de réception afin de réduire les interférences, comme explicité dans le chapitre suivant.

Actuellement, les protocoles de routage ad hoc ne prennent pas en charge cette problématique du multisupport.

La prise en compte du contexte géographique des noeuds

L'utilisation du contexte géographique des noeuds permet d'avoir un "routage directionnel". La distribution des noeuds dans le réseau n'est pas aléatoire comme dans le cas d'un réseau ad hoc classique. Les noeuds sont fixes ou ils évoluent suivant des distributions connues (le long d'une route, au sein d'une parcelle). Le mouvement des noeuds n'est

pas aléatoire. Par certains aspects, le protocole CIVIC est donc un protocole de routage géographique.

Si la direction d'émission est connue et que cette information est utilisée pour le routage, la qualité de transmission est nettement augmentée tant au niveau du PDR (Packet Delivery Ratio) qui augmente, que du délai qui diminue et ce pour des protocoles de routage traditionnels comme AODV et DSR [Hao 05]. Pour des paquets de 128 octets, la simulation sous NS2 montre que l'utilisation de l'information directionnelle permet de doubler le PDR pour AODV et de le tripler pour DSR. La densité des noeuds dans les réseaux agri-environnementaux pouvant être faible, il est dont important d'optimiser les émissions en privilégiant les directions où se trouvent potentiellement les noeuds.

Le protocole CIVIC est également hybride. Le mode de fonctionnement ad hoc ne sert qu'à atteindre un point de l'infrastructure. La prise en compte du contexte se fait par l'utilisation de cartes géographiques qui donnent la position des routes, des parcelles, et par l'utilisation de la position des points d'accès à l'infrastructure appelés les Multisupport, Multiservice Router and Server (MMRS). Ces MMRS peuvent se situer le long d'une route ou à des points stratégiques d'une exploitation agricole (la ferme, une station de pompage d'eau...). Chaque fois qu'un mobile passe à portée d'un MMRS, il lui signale sa destination, ce qui permet au MMRS d'avoir une représentation dynamique de la distribution des noeuds.

La destination des noeuds est un paramètre également important pour le routage afin de savoir vers quel MMRS ils se rapprochent. Le contexte des noeuds est donc connu sous la forme d'un identifiant soit de route, soit de parcelle, c'est le $Road_Number$ et par le MMRS le plus proche $Next_MMRS_Destination$. Chaque noeud a donc à sa disposition deux variables de contexte, le $Road_Number$ et le $Next_MMRS_Destination$. Ces variables de contexte permettent de déterminer les directions de broadcast de l'information pour un noeud en fonction de sa position et du MMRS à atteindre.

La différenciation de service

Les messages envoyés par les noeuds sont classifiés suivant différentes catégories et donc différents niveaux de priorité : messages d'urgence, messages de contrôle, messages d'ordre général...

Pour éviter un effondrement du réseau, la taille des messages est également adaptée en fonction du nombre de sauts et de la capacité du réseau. La capacité du réseau est estimée en permanence. Cette adaptation de l'émission par rapport aux messages et aux conditions de trafic du réseau permet de réduire les surcharges et d'augmenter ainsi la QoS globale.

La prise en compte de la connectivité

Les réseaux agri-environnementaux considérés ici sont mixtes : ad hoc et infrastructure. Le protocole quant à lui est de type hybride, à la fois proactif et réactif.

La densité des noeuds peut être très variable en fonction de leur position ou de l'heure. Par exemple, la journée une parcelle peut accueillir plusieurs véhicules en plus des capteurs à demeure alors que, la nuit, les capteurs sont les seuls noeuds présents sur la parcelle.

La prise en compte de la vitesse et de la position du noeud fait que la distance et le temps pour atteindre le MMRS le plus proche sont connus. L'émission d'un message n'est donc effectuée que si le destinataire est potentiellement joignable, sinon il est mis en file d'attente, tant que les conditions ne sont pas meilleures.

CIVIC utilise la position des véhicules pour choisir entre émettre vers un noeud mobile ou attendre d'atteindre un MMRS. Il est important d'avoir suffisamment de MMRS à des endroits stratégiques afin de garder une connectivité même en cas de faible densité de noeuds.

Les MMRS assurent les principales fonctions suivantes :
- maintenir une file d'attente pour les noeuds mobiles absents,
- maintenir une file d'attente des messages d'alarme destinés à tous les noeuds,
- relayer les messages vers les autres MMRS.

Les MMRS maintiennent donc deux files d'attente. La première est dédiée aux messages privés de chaque noeud et la seconde au stockage des messages d'alarme. Quand un noeud atteind un MMRS, il envoie un message de requête le signalant auprès du MMRS. Si un message privé ou un message d'alarme est en attente, le MMRS transmet le message en y incluant des informations de contexte comme la densité de noeud. Le MMRS détruit alors les messages privés du noeud. Un message est également envoyé au $Next_MMRS_Destination$ du noeud. Le mode ad hoc est donc limité et les messages ne sont propagés dans le réseau que jusqu'au $Next_MMRS_Destination$: CIVIC est donc un protocole sans boucle ("loop free").

Un broadcast directionnel

Afin de limiter la quantité de messages sur le réseau, le broadcast à un saut est utilisé pour découvrir les voisins au lieu de la technique d'inondation. Chaque noeud maintient à jour une table de routage (Routing Table (RT)) composée de sous tables : une avant (Front Routing Table (FRT)) et une arrière (Back Routing Table (BRT)).

A chaque instant, un noeud est donc situé entre deux MMRS et la direction d'émission avant est déterminée par la position du $Next_MMRS_Destination$ et par la variable $Road_Number$. La direction arrière d'émission est la direction opposée (demi plan arrière entre le noeud et le MMRS précédent.

L'utilisation de la stabilité du réseau

Pour réduire la bande passante utilisée par les messages de contrôle, la stabilité des liens est introduite comme dans le cas du protocole de routage ABR. Dans CIVIC, le broadcast directionnel de demande de route n'est effectué que si l'état de stabilité du lien est périmé. L'état de stabilité est fonction de la mobilité des noeuds (plus un noeud est mobile, plus la stabilité des liens le reliant aux autres est faible).

La compatibilité avec Internet ("IP Core")

Les applications fonctionnant sur les noeuds sont compatibles avec Internet et peuvent y accéder de façon transparente. Des transpositions d'adresses peuvent être réalisées au niveau des MMRS.

Un comportement Fairly Full Confidence Cooperative and Competitive pour les noeuds du réseau

Le broadcast directionnel à un saut est compétitif entre les noeuds qui collaborent à ce broadcast. Les noeuds ont un comportement Fairly Full Confidence Cooperative and Competitive (FFCCC).

Chaque noeud situé dans la direction du broadcast fait de son mieux pour transférer le message reçu s'il n'est pas destinataire. Cette transmission se fait en compétition avec ses voisins. Si un noeud reçoit une seconde fois un message de broadcast, il abandonne le renvoi, même s'il n'a pas renvoyé le premier message. C'est le noeud le moins occupé qui assure le relais. Cette technique de broadcast FFCCC permet d'atteindre rapidement le MMRS le plus proche situé dans la direction du broadcast. Par exemple, sur la Figure 3.2, le noeud N00 émet un message en direction l'infrastructure ($Next_MMRS_Destination$). Les noeuds N01 et N02 reçoivent le message, le noeud N01 est le plus prompt à réagir et renvoient le message avant N02. N02 reçoit à nouveau le message et de N00 (émit par N01) et ne propage donc pas l'information. Le mécanisme se reproduit ainsi de proche en proche.

Chaque noeud fait de son mieux pour faire suivre une information reçue sans lire ni modifier le contenu du message si le message ne lui est pas destiné. Le comportement FFCCC des noeuds permet d'améliorer l'efficacité de la communication de groupe et dans le broadcast de message d'urgence en utilisant la compétition entre noeuds plutôt qu'un multicast classique.

Cette technique de compétition entre les noeuds permet également de minimiser la consommation énergétique des noeuds : si lorsque la réserve d'énergie d'un noeud diminue, la fréquence de son processeur est réduite pour augmenter sa durée de vie, le noeud sera moins rapide que ses voisins et ne participera donc pas au broadcast compétitif. Ceci permet de privilégier les noeuds ayant le plus d'énergie dans le réseau pour acheminer les

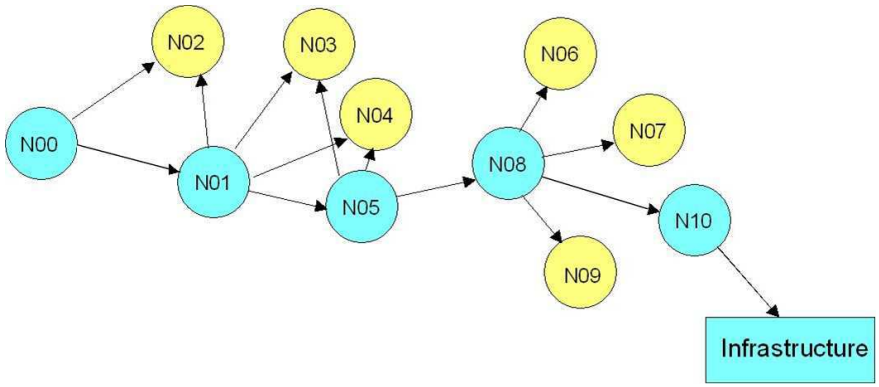

Figure 3.2 – Le principe des noeuds FFCCC

messages. La compétition entre les noeuds permet donc de répartir la consommation liée au broacast de messages sur l'ensemble du réseau.

Comme tout les protocoles, CIVIC repose sur un formalisme des paquets de données mis en oeuvre et sur des fonctions spécifiques.

3.2 La description détaillée de CIVIC

Les interférences radios perturbent beaucoup les protocoles de routage géographiques (c'est le cas de CIVIC) car, dans certaines zones, les messages ne passent que dans une seule direction (lien asymétrique). A cause de ces interférences radios, Zhou et al. proposent une technique de routage multi-cercles pour augmenter la robustesse des communications [Zhou 04]. A cause des contraintes de ressources liées aux noeuds mobiles et des effets des interférences radio, le broadcast semble être le plus adapté pour bien acheminer les messages mais, dans les réseaux ad hoc, le broadcast pose de sérieux problèmes de contention, de collision et de redondance [Tseng 03], ce que Ni et al. appellent un "broadcast storm" [Ni 99]. Il faut donc bien étudier les différentes formes de broadcast.

Les travaux de Williams et Camp différencient plusieurs catégories de techniques de broadcast [Williams 02] :

1. *l'inondation simple* : le principe débute avec un noeud source qui broadcast un paquet à tous ses voisins ; chaque voisin broadcast à son tour le message ; cette technique est bien adaptée aux réseaux de faible densité et/ou à forte mobilité. Dans l'inondation simple, chaque noeud rebroadcast tous les messages reçus ;
2. *la méthode basée sur les probabilités* : cette technique est similaire à la précédente sauf que les noeuds ne rebroadcast les messages que suivant une probabilité prédéfinie ; quand la probabilité est de 1, la méthode est la même que celle de l'inondation simple ;
3. *la méthode basée sur des zones* : le broadcast est réalisé suivant des schémas basés sur la position des noeuds ou sur les distances séparant les noeuds ;
4. *la méthode basée sur la connaissance des voisins* : elle se divise en deux sous méthodes de dimensions différentes :
   (a) l'inondation de taille unitaire : chaque noeud connaît ses voisins à un saut via des messages périodiques de type Hello,
   (b) les noeuds ont une connaissance de leurs voisins à deux sauts.

Le broadcast est une technique facile à mettre en oeuvre mais un "broadcast storm" peut se produire et l'atteignabilité n'est pas garantie. Tseng et al. ont démontré que moyennement une approche basée sur un compteur et la prise en compte de la position que le dilemme entre l'atteignabilité et le "broadcast storm" pouvait être résolu [Tseng 03]. Malgré tout, la notion d'unicast unidirectionnel basé sur le broadcast et l'adaptation dynamique de la fréquence d'émission des messages Hello, n'a pas été pris en compte dans les travaux de Tseng et al.

Au niveau de CIVIC, deux types de techniques de communication sont implémentés :
- l'unicast qui est uniquement utilisé pour les communications entre noeuds voisins à un saut nommées communications "*one-hop peer-to-peer*", est en fait un broadcast mono-saut,

– le "Directional Area Neighbour Knowledge Adaptive Broadcast (DANKAB)" qui est utilisé pour les communications à plusieurs sauts ("*multi-hop peer-to-peer*"), le multicast et le broadcast.

De plus, la taille de l'en-tête des paquets est variable et des métadonnées sont utilisées afin de réduire la taille des paquets pour diminuer la bande passante utilisée et augmenter la robustesse des communications. La taille des en-têtes de paquets est fonction de la nature des paquets.

Le type de paquets détermine la technique de communication devant être mise en oeuvre : l'unicast ou le DANKAB. Le DANKAB est adaptatif en fonction du voisinage du noeud, il est composé de :
– l'inondation ou broadcast simple pour tous sans conditions, (au moins un noeud est joignable, la demande de route utilise ce type de diffusion) ;
– le broadcast conditionné par la direction (il y a plus de deux voisins) ;
– le broadcast conditionné par la distance (il y a plus de deux voisins) ;
– le broadcast conditionné par la direction et la distance (la densité de noeuds est élevée).

Les éléments clés de la pile de protocole CIVIC sont :
– la taille variable des en-têtes de paquets en fonction du contexte :
  • la taille dépend du type de paquet,
  • la taille d'un paquet est limitée à 256 octets (la taille par défaut des paquets est de 64 octets),
  • les données sont représentées sous forme de métadonnées et compressées afin de limiter la taille des paquets,
  • les adresses peuvent être sur 8 ou 16 bits en fonction de l'application ; ces adresses correspondent aux champs de poids faible de l'adresse IP des noeuds, la translation est réalisée au niveau des MMRS.
– le broadcast compétitif et adaptatif.

Les différents paquets mis en oeuvre dans CIVIC sont explicités dans le paragraphe suivant.

3.2.1 Le format des paquets dans CIVIC

Le protocole CIVIC s'appuie sur différents paquets pour assurer son bon fonctionnement. Comme cela a été vu précédemment, les messages de contrôle de CIVIC peuvent se décomposer en deux catégories : les messages à un saut (one-hop) et les messages multi-sauts (multi-hop).

Le format des paquets pour les messages à un saut

Afin de présenter les paquets du protocole CIVIC, le formalisme suivant est utilisé pour décrire le contenu d'un paquet :

$$\{Var_1, Var_2, \cdots, Var_n\}$$

où Var_i $(i = 1, \cdots, n)$ représente les différentes variables composant chacun des champs du paquet.

Pour l'expression du format des paquets pour les messages à un saut, les variables suivantes sont définies :
- $PckType$: type de paquet (1 octet) ;
- $SrcAdr = SrcId$: adresse de la source (1 ou 2 octets) ;
- $SrcLoc(X, Y)$: localisation de la source (4 octets) ;
- $DstAdr = DstId$: adresse de la destination (1 ou 2 octets) ;
- $PckId$: identifiant de paquet (1 octet) ;
- $SndTime$ = h:min:s:ms : heure d'envoi du paquet donnée par le GPS (4 octets) ;
- $Metadata$: données à envoyer (taille variable) ;
- CRC : contrôle de l'intégrité du paquet (2 octets).

Ces paquets concernent donc les voisins immédiats d'un noeud, c'est-à-dire ceux à portée radio. Les paquets de ce type, identifiés par la variable $PckType$, sont au nombre de quatre :
- les paquets Hello (*one-hop broadcast hello packet*) qui permettent aux noeuds de s'informer mutuellement de leur présence ;
- les paquets de réponse Hello (*one-hop hello reply packet*) ;
- les multi-paquets (*one-hop peer-to-peer multi-packet*) qui permettent d'agréger plusieurs paquets pour échanger de l'information entre noeuds voisins à un saut ;
- l'acquittement des paquets (*one-hop peer-to-peer acknowledgement packet*).

Ces paquets sont définis de la façon suivante :

1. *one-hop broadcast hello packet* :

   Les paquets "one-hop broadcast hello packet" sont de la forme :

   $$\{PckType, SrcAdr, SrcLoc(X, Y), DstAdr, PckId, SndTime, CRC\}$$

   Les paquets Hello sont émis par les noeuds du réseau afin de se signaler à leurs voisins situés à portée radio. Chaque noeud qui a reçu un message Hello répond par un paquet "one-hop hello reply packet".

   Remarque :
   Soit $H_x(t)$ définissant l'envoi par le noeud x au temps t d'un message Hello.

Quelque soit i, si $|D(x,i)| \leq R_x$, alors le noeud i recevra le paquet Hello de x ; où R_x est le rayon de la couverture radio de x (assimilée à un cercle) et $D(x,i)$ est la distance séparant le noeud x et le noeud i.
Soient $R(H_x(t))$ la réponse à $H_x(t)$ de la part des voisins de x et $n = Card(R(H_x(t)))$ le nombre de voisins de x ayant répondus. Les collisions, la mobilité et les autres perturbations entraînent alors l'inégalité 3.1 :

$$Card(R(H_x(t_1))) \neq Card(R(H_x(t_2))) \tag{3.1}$$

2. *one-hop hello reply packet* :
   Les paquets de réponse aux messages Hello, "one-hop hello reply packet" se présentent sous la forme :

   $$\{PckType, SrcAdr, SrcLoc(X,Y), DstAdr, PckId, SndTime, Nd, \Delta t, CRC\}$$

   où Nd correspond à la direction du noeud et Δt à la période d'émission des messages Hello ($H_x(t)$).

3. *one-hop peer-to-peer multi-packet* :
   Le format de base "one-hop peer-to-peer multi-packet" est le suivant :

   $$\{PckType, SrcAdr, SrcLoc(X,Y), DstAdr, PckId, SndTime, Metadata, CRC\}$$

   Remarque :
   Lorsque l'identifiant de paquet $PckId = 0$, cela signifie que c'est la fin d'un message multi-paquets. Une trame de messages multi-paquets peut contenir jusqu'à 255 paquets de 256 octets. Ainsi la taille maximale d'une trame est 65280 octets, le dernier paquet ayant un $PckId$ égal à 0. La taille minimale d'un paquet est de 14 octets (pour des adresses sur 1 octet).
   Les paquets de type pair à pair ne servent qu'à échanger des messages entre deux noeuds situés dans la même couverture radio. Dans CIVIC, lorsque les noeuds sont hors de portée radio (plus d'un saut de distance), le mécanisme DANKAB est utilisé.

4. *one-hop peer-to-peer acknowledgement packet* :
   Le format "one-hop peer-to-peer acknowledgement packet" est :

   $$\{PckType, SrcAdr, SrcLoc(X,Y), DstAdr, PckId, SndTime, CRC\}$$

   Les acquittements ne sont pas toujours nécessaires et dépendent du type de paquets émis. Un $PckId = 0$ marque un acquittement global de paquet.

Le format des paquets pour les messages à plusieurs sauts

Les messages à plusieurs sauts sont plus nombreux. Il y a deux catégories de messages multi-sauts :

- les messages d'échange de données :
  - les échanges unicast, *multi-hop peer-to-peer exchange packet*,
  - les acquittements de messages, *multi-hop peer-to-peer acknowledgement packet*,
  - les échanges multicast, *multicast packet*,
  - les broadcast, *broadcast packet*,
- les messages liés à la recherche de route :
  - les recherches de route, *route request packet*,
  - les réponse de route, *route reply packet*.

Afin de définir les formats de ces messages, des variables supplémentaires sont définies :

- $DstLoc(X, Y)$: localisation de la destination (4 octets) ;
- $NxRtrRlyAdr$: adresse du prochain MMRS (1 ou 2 octets) ;
- $NxRtrRlyLoc(X, Y)$: localisation du prochain MMRS (4 octets) ;
- $HopNb$: nombre de sauts effectués (1 octet).

Ces différents paquets sont définis de la façon suivante :

1. *multi-hop peer-to-peer exchange packet* :

   Les "multi-hop peer-to-peer exchange packet" ont pour format :

   $$\{PckType,\ SrcAdr,\ SrcLoc(X,Y),\ DstAdr,\ DstLoc(X,Y),\ NxRtrRlyAdr,\ NxRtrRlyLoc(X,Y),\ HopNb,\ PckId,\ SndTime,\ Metadata,\ CRC\}$$

   Ces paquets servent à échanger des données entre noeuds sous forme unicast. La localisation de la destination est obtenue par un paquet de requête de route. Le broadcast adaptatif DANKAB est utilisé au lieu du classique échange pair à pair.

2. *multi-hop peer-to-peer acknowledgement packet* :

   Les "multi-hop peer-to-peer acknowledgement packet" se présentent sous la forme suivante :

   $$\{PckType,\ SrcAdr,\ SrcLoc(X,Y),\ DstAdr,\ DstLoc(X,Y),\ PckId,\ SndTime,\ CRC\}$$

   Les acquittements ne sont pas systématiques et dépendent du type de paquets envoyés.

3. *multicast packet* :

   La forme des "multicast packet" est la suivante :

   $$\{PckType,\ SrcAdr,\ SrcLoc(X,Y),\ NxRtrRlyAdr,\ NxRtrRlyLoc(X,Y),\ GrpId,\ HopNb,\ PckId,\ Metadata,\ CRC\}$$

où un identifiant de groupe ($GrpId$) est ajouté dans l'en-tête des paquets et l'adresse du prochain MMRS ($NxRtrRlyAdr$) est utilisée pour évaluer la direction du groupe multicast. L'adresse du MMRS est obtenue à partir des informations de contexte.

4. *broadcast packet* :
   Les "broadcast packet" sont formés des champs suivants :

   $$\{PckType,\ SrcAdr,\ SrcLoc(X,Y),\ NxRtrRlyAdr,\ NxRtrRlyLoc(X,Y),\ HopNb,\ PckId,\ Metadata,\ CRC\}$$

5. *route request packet* :
   Les "route request packet" ont la forme suivante :

   $$\{PckType,\ SrcAdr,\ SrcLoc(X,Y),\ DstAdr,\ DstLoc(X,Y),\ HopNb,\ PckId,\ CRC\}$$

6. *route reply packet* :
   Les "route reply packet" contiennent la route codée de cette façon :

   $$\{PckType,\ SrcAdr,\ SrcLoc(X,Y),\ Nadr_1,\ NadrLoc_1(X,Y),\ ...,\ Nadr_i,\ NadrLoc_i(X,Y),\ HopNb,\ PckId,\ CRC\}$$

   où $Nadr_i$ et $NadrLoc_i(X,Y)$ représentent les informations (adresse et localisation) des différents noeuds composant la route.
   Ces paquets peuvent aussi avoir la forme suivante :

   $$\{PckType,\ SrcAdr,\ SrcLoc(X,Y),\ HopNb,\ PckId,\ CRC\}$$

   Dans ce cas, le noeud source n'utilise pas un chemin en particulier pour joindre la destination mais utilise le broadcast compétitif et adaptatif en donnant la direction de la destination.

3.2.2 Le fonctionnement de CIVIC

Le protocole CIVIC repose sur différents principes assurant son fonctionnement.

Tout d'abord, comme cela a été présenté dans les paragraphes précédents, CIVIC utilise des émissions directionnelles. La direction est déterminée de la façon suivante : chaque noeud est localisé par ses coordonnées X et Y dans un repère ayant pour origine les coordonnées du prochain MMRS.

Soient N_A le noeud A et BS le MMRS. Les coordonnées dans le repère choisi sont $N_A(X_A, Y_A)$ et $BS(0,0)$. La direction α entre A et BS est donc donnée par l'équation 3.2 :

$$tg(\alpha) = \frac{Y_A}{X_A} \tag{3.2}$$

Soit un noeud B, $N_B(X_B, Y_B)$, la direction α entre A et B est donnée par l'équation 3.3 :

$$tg(\alpha) = \frac{|Y_A - Y_B|}{|X_A - X_B|} \tag{3.3}$$

Pour qu'un noeud participe au broadcast, il faut que la direction α soit comprise entre $\pm 45°$et que la distance de A à B soit telle que :

$$D_{AB} = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2} < D_{AD} \tag{3.4}$$

où D_{AD} est la distance entre le noeud source A et le noeud destinataire D. Si aucun noeud n'est présent dans la direction $\overrightarrow{AD}$ dans l'angle α, la valeur de α peut augmenter jusqu'à 360° : cela correspond à une inondation du réseau. Par exemple, la Figure 3.3, montre dans le cas 1, une valeur de α de $\pm 45°$permettant d'atteindre la destination, alors que, dans le cas 2, cette valeur est insuffisante pour le noeud A et une valeur de α' de $\pm 90°$est nécessaire pour le premier envoi.

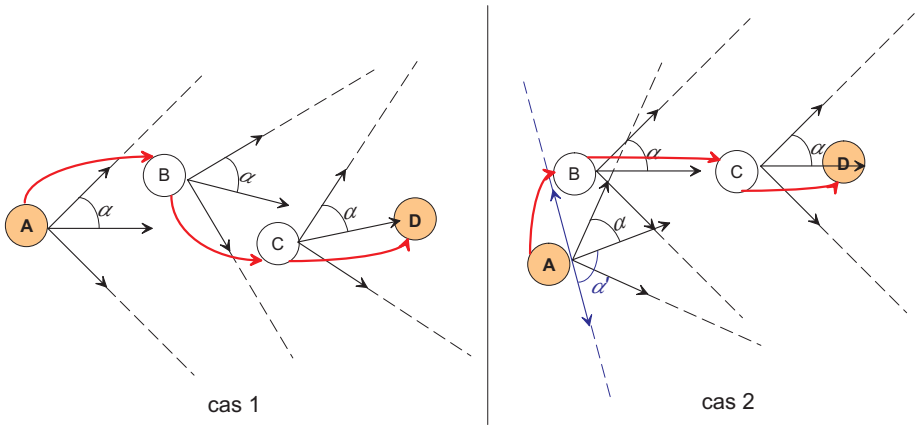

Figure 3.3 – Adaptation de l'angle α pour le DANKAB

Ce principe de direction et de distance est à rapprocher des mécanismes présents dans des protocoles comme DREAM, LAR2 et GPSR.

Un autre élément important dans le fonctionnement de CIVIC, comme pour tous les protocoles de routage ad hoc, est l'intervalle de temps entre l'envoi de deux paquets Hello successifs. En effet, il faut trouver un compromis entre la pertinence de l'information et la non surcharge du réseau. Dans le protocole CIVIC, la stabilité du réseau est utilisée pour déterminer cet intervalle, elle est déclinée au niveau de chaque noeud sous la forme d'une variable Node_Link_Stability définie un peu plus loin dans ce chapitre.

Soient un noeud A, $N_A(X_A, Y_A)$ et ses voisins obtenus avec les paquets Hello. Le noeud voisin dont la distance de A est la plus proche de la portée radio R du noeud A, est noté

N_A^{max} (en fait le noeud voisin le plus éloigné de A). Les vitesses des noeuds sont v_A et v_A^{max}. Alors l'intervalle dynamique d'envoi des paquets Hello est défini par l'égalité 3.5 :

$$\Delta t = \frac{|R - |X_A - X_A^{max}||}{\|v_A\| - \|v_A^{max}\|} \tag{3.5}$$

Le protocole CIVIC est en partie proactif, donc la fonction de routage est basée sur l'utilisation d'une table de routage RT. Mais comme CIVIC n'est pas un protocole purement proactif, la RT ne contient qu'une vision parcellaire du réseau. La RT est en fait une collection d'objets (noeuds) et chaque objet a les attributs suivants :

- NID : l'adresse du noeud ;
- $Node_Position$: la position du noeud, notée np, définie par ses coordonnées X et Y. Les données brutes du GPS peuvent être corrigées par des informations supplémentaires comme les coordonnées des MMRS par exemple, ou des relations de topologie (une voiture est sur la route, un tracteur est dans telle parcelle...) ;
- $Node_Mean_Speed$: la vitesse moyenne du noeud, notée $nms[x]$, est estimée grâce à la position du noeud, les informations géographiques et le temps, $nms[x] = \frac{\delta d}{\delta t}$ où δd est la distance parcourue pendant le temps δt ;
- $Node_Direction$: la direction du noeud, notée nd, est déterminée en utilisant la position Loc(X,Y) et celle du prochain MMRS ;
- $Node_Link_Capacity$: cet attribut, noté $nlc[x]$, indique la capacité du médium d'accès x ; cette capacité est déterminée par l'estimateur de bande passante NIMBE exposé dans le chapitre suivant [Chanet 06b] ; $nlc[x]$ est mise à jour à chaque réception de message ;
- $Node_Link_Range$: la portée radio du médium d'accès x, notée $nlr[x]$, peut évoluer dans le temps pour un support x donné suivant le mode de modulation utilisé (par exemple en cas de forte densité de noeuds, le IEEE 802.11b peut être initialisé à un débit de 11 Mb/s avec une portée faible ou, en cas de faible densité, l'initialisation peut se faire à un débit de 1 Mb/s avec une grande portée) ;
- Node_Link_Stability : cet attribut, noté nls, est en fait un indicateur de la mobilité du noeud mis à jour périodiquement ; il est défini par $nls = \delta r/\delta v$ où $\delta r = nlr - np$ et $\delta v = nms[x(t)] - nms[x(t-1)]$;
- Update_Time : est le temps lorsque les données ont été actualisées.

La RT est mise à jour en fonction de la stabilité du réseau. Dans le cas de réseau dense, pour chaque direction, seuls deux voisins sont gardés dans la RT afin de minimiser l'occupation mémoire. Ainsi, pour deux médiums d'accès sans fil, la taille de la RT est 104 octets (13 octets $\times$ 4 noeuds de destination fréquente (pour 2 supports) $\times$ 2 directions).

Afin d'assurer le fonctionnement de CIVIC, des fonctions spécifiques ont été développées :

1. Select(i) : sélectionne le médium d'accès i parmi ceux disponibles. La sélection se fait en fonction du type de message et de l'état du lien.

2. Route_Request_Broadcast(m) :
   La fonction a pour but de découvrir une route permettant de faire le lien entre la source et la destination du message m. Afin d'optimiser l'utilisation de la bande passante, la demande de route est faite uniquement si la stabilité d'un lien est périmée ou s'il n'y a pas de voisin dans cette direction.

   L'algorithme de cette fonction est le suivant :
   Begin
   Port :=Select(i) ;
   Choix de la direction := devant ou derrière ;
   Broadcast(Port,m) ; ▷ Pour chaque réponse, la RT est mise à jour
   Set_send_wakeuptime() ; ▷ Quand la connectivité est inexistante, le noeud mobile calcule un temps à partir de sa position, de sa vitesse et de la localisation du prochain MMRS afin d'attendre cette durée pour envoyer le message
   End.

3. Send($DstId, m$) : envoie un message m à une destination $DstId$.
   Le message m contient les attributs CIVIC suivants : SrcId, SrcLoc(X,Y), DstId, DstLoc(X,Y), MMRS_id, message_type, message_number, mttl, mhn, SndTime avec :
   - MMRS_id : adresse du prochain MMRS ;
   - message_type : emergency_unicast, emergency_broadcast, normal group ou unicast ;
   - message_number : à cause des interférences, le même message peut être reçu plusieurs fois ; aussi, chaque message possède un numéro de séquence ;
   - *mttl* : c'est le "maximum time to live" d'un paquet ; par défaut, il est initialisé à la durée estimée pour parcourir la distance jusqu'au prochain MMRS ;
   - *mhn* : c'est le nombre maximum de sauts que doit faire le message. *mhn* est défini par l'expression 3.6 :

$$mhn = 2 \times \frac{|LMMRS(Y) - LMMRS(X)|}{R(p)} \tag{3.6}$$

   où $LMMRS$ est la localisation du prochain MMRS et $R(p)$ la portée radio du port p de l'interface radio considérée.

La fonction est définie par l'algorithme suivant :

Begin

Initialisation des attributs du message ;

if <Au moins un voisin existe> **then**
if <un lien à jour existe> **then**
p :=Select(port) ; ▷ En fonction de l'état des liens, du type de message, le message pouvant être fragmenté pour éviter les collisions
Transmit(p, m, time) ;
else
Route_Request_Broadcast(m) ;
Transmit(p, m, time) ;
end if
else
Sauvegarde du message dans la queue d'envoi ;
Set_send_Wakeuptime() ;
end if

End.

4. Listen(p) : écoute le port p. Dans CIVIC tous les médiums d'accès sont activés en lecture ; aussi, quand un message arrive, il est immédiatement traité en fonction de son type.

5. Routing_Table_Update() :
La mise à jour de la table de routage est faite quand le noeud reçoit une réponse de demande de route, avec un message Route_Request_Reply := NID, Loc(X,Y), sending_time. Le noeud déduit également les paramètres suivants de cette réponse : nms, nd, nlc, nlr et nls.

6. Broadcast($port, m$) :
Le broadcast utilise le comportement FFCCC des noeuds. Le concept FFCCC simplifie le broadcast et augmente l'efficacité, la robustesse de la transmission. Le broadcast est assuré par la fonction Broadcast($port, m$) et l'algorithme est le suivant :

Begin

Initialisation des attributs du message ;
Tous les noeuds situés dans la couverture radio de la source et se trouvant dans la direction de la destination essayent de renvoyer le message :
$mhn \leftarrow mhn - i$; ▷ Initialisation des attributs du message
$mttl \leftarrow mttl$−receive_time ;
if (mhn of sending message)≤(mhn of new receiving message) & ($mttl > 0$) **then**
le paquet est détruit ▷ Le message n'est pas broadcasté plusieurs fois

else
Le paquet est broadcasté
end if
End.

L'opération est répétée tant que *mhn* et *mttl* sont supérieurs à 0 ou qu'un MMRS est atteint (voir la Figure 3.2 page 55).

3.2.3 La structure de la pile CIVIC

Le protocole a une structure de pile en quatre couches (voir la Figure 3.4) : application, réseau, couche MAC et couche d'adaptation MAC-Radio.

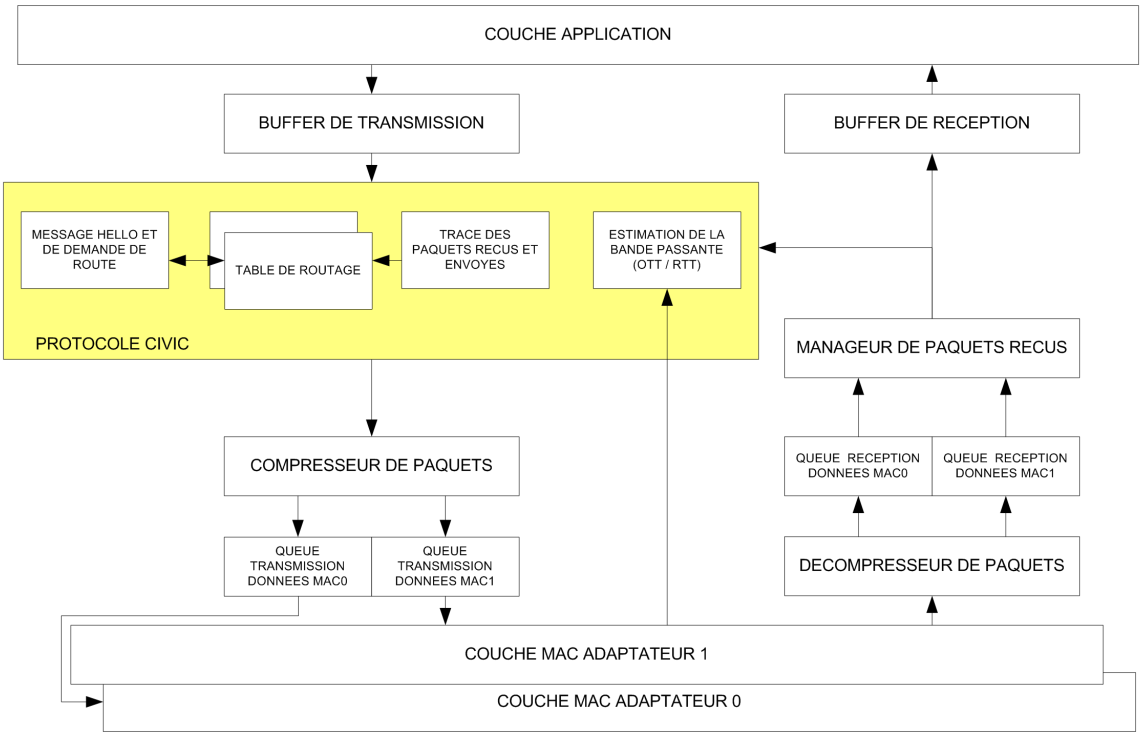

Figure 3.4 – La structure du protocole de routage CIVIC

Chaque noeud utilise un système d'exploitation dédié, nommé LIMOS (LIghtweight Multi-threading Operating System) développé au sein du laboratoire [Zhou 06b]. Ce noyau temps réel permet de gérer les événements et les threads. De plus, il présente une très faible empreinte mémoire lui permettant de s'implémenter facilement sur des microcontrôleurs de type ARM7 par exemple. Il est présenté plus en détail dans la section suivante.

3.3 L'intégration de CIVIC : embedded-CIVIC

Une partie des noeuds des réseaux agri-environnementaux est embarquée sur des véhicules et l'autre est constituée de capteurs en réseau. La faible consommation d'énergie est un élément clé dans les RCSF afin de garantir une durée de vie importante et un coût raisonnable. Aussi, cette notion d'économie de la consommation énergétique a guidé la conception de e-CIVIC (embedded-CIVIC) : c'est le concept d'"energy-driven approach" [Vijaykrishnan 00].

Afin de minimiser la consommation d'énergie, les dispositions suivantes concernant le logiciel et le matériel ont été prises :

- **les algorithmes** : un compromis est recherché entre complexité, efficacité et besoins en ressources ;
- **la question du matériel** : une architecture basée sur le concept multicomposants ("component-based") a été retenue, car ce type d'architecture est flexible, ajustable aux besoins et tolérant aux pannes ;
- **l'utilisation des ressources et la consommation énergétique** : l'utilisation du CPU, de la mémoire, des communications dépendent du contexte. Par exemple, la transmission de données via un module de communication consomme plus d'énergie que le stockage des données dans la SRAM locale. Ainsi, pour réduire la consommation, de nouvelles métriques sont introduites permettant au noyau et au "middleware" de prendre des décisions optimales concernant la consommation ;
- **le protocole de routage et le middleware** : des métadonnées sont utilisées afin de réduire le volume des échanges et donc la consommation ;
- **la gestion des alimentations** : les composants et les périphériques sont activés uniquement lorsque cela est nécessaire.

Le concept d'architecture multicomposants est maintenant explicité.

3.3.1 Le concept d'architecture multicomposants

Un objet communicant sans fil i noté WO_i est composé d'un ensemble de composants $\{C_k; k = 1, \ldots, N\}$ (voir la Figure 3.5). Un composant possède des ressources matérielles et logicielles afin de pouvoir exécuter plusieurs threads d'une application ; par exemple, un microcontrôleur est un composant. Un composant contient plusieurs équipements : un processeur, de la mémoire, des périphériques, etc.

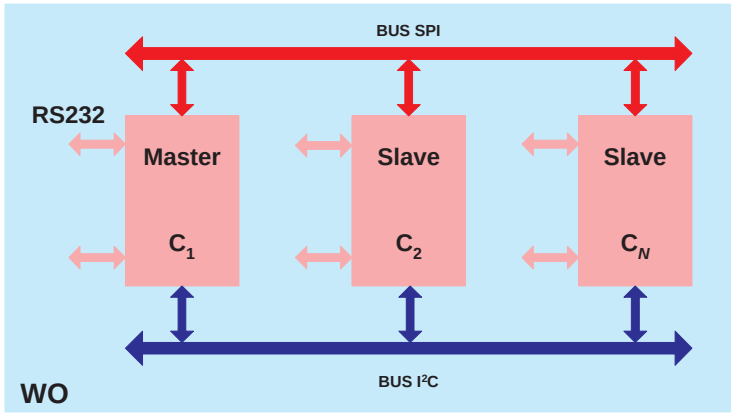

Figure 3.5 – Un objet communicant sans fil basé sur un ensemble de composants

Le principe d'architecture multicomposants permet d'implémenter facilement deux types de parallélisme :

- **Distribué** : collaboration entre les objets communicants WO_i avec $i = 1, \ldots, N$
- **Localisé** : collaboration entre les composants C_k avec $k = 1, \ldots, L$

Un capteur sans fil, noté WS, est donc réalisé avec un ensemble de WO_i $(i = 1, \ldots, N)$ (voir la Figure 3.6). Une application spécifique est, quant à elle, réalisée par un RCSF WS_i $(i = 1, \ldots, M)$.

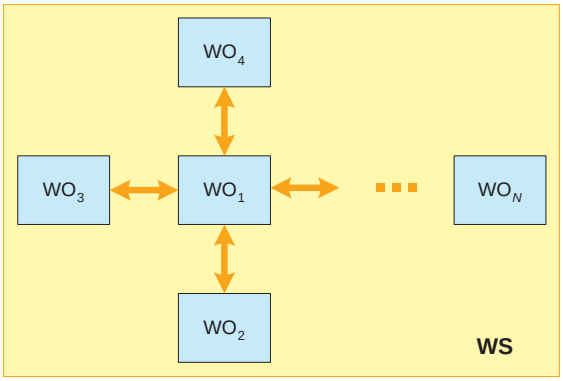

Figure 3.6 – Un capteur sans fil basé sur un ensemble d'objets communicants

Le problème majeur des RCSF est donc la consommation énergétique. Mais, avec une architecture comme décrite précédemment, le système peut être dimensionné avec le minimum de ressources matérielles et logicielles en adéquation avec les besoins de l'application. Le système d'exploitation doit être à même de gérer la gestion énergétique des différents composants en fonction de leur activité.

3.3.2 Le micro noyau temps réel LIMOS

Les modules e-CIVIC sont donc basés sur l'architecture multicomposants. Il existe de nombreux Operating System (OS) dédiés aux RCSF. Ils peuvent se répartir suivant trois catégories :

- ceux basés sur la gestion des évènements comme TinyOS [Levis 03] et Contiki [Dunkels 04],
- ceux basés sur le multithreading comme NutOS [Egn 05],
- ceux basés sur le multitâches centré données comme AmbientRT [Hofmeijer 04].

Mais tous ces OS ne prennent pas en compte le concept de tolérance aux pannes, ni celui d'architecture multicomposants qui implique des notions d'abstraction pour les drivers et de méta système de fichiers. De plus, ces différents OS n'intègrent pas de protocole de routage.

Un nouvel OS a donc été conçu : LIMOS (LIghtweight Multi-threading Operating System) [Zhou 06b]. Cet OS, coeur des modules e-CIVIC, assure le fonctionnement des modules et intègre le protocole de routage CIVIC.

Le micro noyau LIMOS [Zhou 06b] est le descendant du noyau SDREAM [Zhou 06c]. LIMOS est un OS tolérant aux pannes. Il possède un "chien de garde" qui peut rebooter le système en cas de défaillance. De plus, le mécanisme de synchronisation et de communication entre les composants est basé sur le concept du langage parallèle LINDA (tuple et IN/OUT) [Zhou 06c], permettant d'avoir plusieurs CPU et plusieurs threads. C'est un OS temps réel avec un méta langage (KML : Kernel Modeling Language) définissant les primitives du système ainsi que leur mode de fonctionnement. Les principales caractéristiques de LIMOS sont :

- *une architecture à deux niveaux : événements et threads.* LIMOS est défini comme un ensemble d'*événements* et chaque *événement* est un ensemble de *threads* (voir la Figure 3.7). Les *événements* et les *threads* sont interruptibles (ils peuvent être interrompus), mais seuls les *threads* sont préemptibles (ils peuvent être suspendus). Quand LIMOS n'a qu'un seul *événement* composé de plusieurs *threads*, il se comporte comme SDREAM et, lorsque chaque *événement* ne possède qu'un *thread*, son fonctionnement est similaire à celui de TinyOS ;
- *une politique d'ordonnancement à deux niveaux* : "*event-driven*" (ordonnancement haut niveau des événements) et "*priority-based preemptive*" (ordonnancement bas niveau des threads) ;
- *le concept LINDA* : un espace d'échanges nommé "*tuple*" avec des primitives d'accès *IN & OUT* est utilisé pour la communication entre les événements, les threads, les périphériques, les CPU.

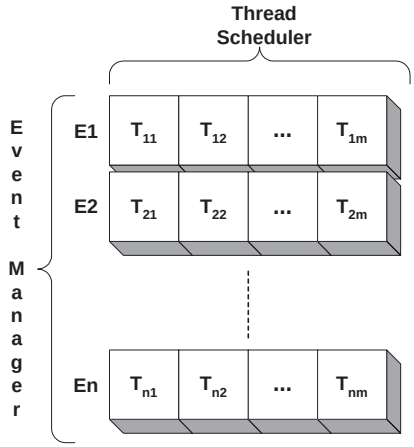

Figure 3.7 – L'architecture de LIMOS

LIMOS est donc défini comme un ensemble d'événements eux-mêmes définis comme étant des ensembles de threads, cela pouvant s'écrire sous la forme des équations 3.7 et 3.8 suivantes :

$$\Re = \{E_i : i = 1, \cdots, n; E_1 \Rightarrow E_2 \cdots \Rightarrow E_n\} \tag{3.7}$$

$$E_i = \{T_{ij}; j = 1, \cdots, m; T_{i1} \| T_{i2} \cdots \| T_{im}\} \tag{3.8}$$

où $\Re$ est une instance de LIMOS, E un événement et T un thread. Le symbole "$\Rightarrow$" indique une opération séquentielle et le symbole "$\|$" une opération parallèle. Lorsqu'un événement commence, il doit être terminé ou interrompu pour qu'un nouvel événement débute.

Chaque événement et chaque thread se voient dotés d'un niveau de priorité qui est déterminant pour l'éxécution. C'est l'ordonnanceur, "Scheduler", de LIMOS qui gère les priorités.

Par exemple, si une instance $\Re$ de LIMOS est définie comme étant constituée de trois événements (E_1^x, E_2^y, E_3^z) avec les niveaux de priorité x, y, z tels que $x > y > z$. Si E_1 est constitué de trois threads $(T_{11}^a, T_{12}^a, T_{13}^b)$, E_2 est contituée de deux threads (T_{21}^a, T_{22}^b) et E_3 contient un seul thread (T_{31}^c), avec les niveaux de priorité a, b, c tel que $a > b > c$. A partir des équations 3.7 et 3.8, l'expression de $\Re$ est de la forme de l'équation 3.9 :

$$\Re = \left\{E_1^x(T_{11}^a \| T_{12}^a \Rightarrow T_{13}^b) \Rightarrow E_2^y(T_{21}^a \Rightarrow T_{22}^b) \Rightarrow E_3^z(T_{31}^c)\right\} \tag{3.9}$$

LIMOS possède deux types d'événements : les matériels et les logiciels. Les événements matériels sont asynchrones et sont produits par les différents périphériques du CPU via

les différentes interfaces (UART, I2C, SPI,...). Les événements logiciels sont, quant à eux, synchrones et produits par les exceptions logicielles (connexion réseau par exemple).

Les threads sont formés d'appels à des procédures qui réalisent les traitements des événements. Les threads sont les éléments essentiels des événements. Un événement contient au moins un thread.

L'empreinte mémoire de LIMOS et CIVIC est de 19713 octets (pour 5 événements et 5 threads), ce qui permet d'intégrer cet ensemble logiciel sur des microcontrôleurs.

LIMOS a été porté avec succès sur différents microcontrôleurs ; la dernière version utilise un ATMEL AT91SAMSS256 qui est basé sur un ARM7TDMI. Les principales caractéristiques de ce processeur sont :
- 256 kilo-octets de mémoire flash interne rapide,
- 64 kilo-octets de SRAM interne rapide,
- 2 USART et un port USB esclave,
- une interface SPI Maître/Esclave,
- un contrôleur synchrone série (SSC),
- un support d'interface I2S,
- 2 UART câblées et un support pour déboguer,
- 1 convertisseur A/D 8 voies 10 bits,
- 9 voies DMA,
- 1 contrôleur parallèle IN/OUT et 3 timers.

Ce processeur est relativement performant (sa fréquence peut varier de 500 Hz à 55 MHz) et est donc bien adapté au réseau de capteurs, car un compromis est possible entre performance et consommation via le réglage de la fréquence. Ce processeur est le coeur des composants constituants des modules e-CIVIC qui sont présentés dans le paragraphe suivant.

3.3.3 La structure d'e-CIVIC

Le module e-CIVIC est basé sur un composant de base présenté sur la Figure 3.8. Le composant de base est constitué d'un processeur comme celui vu précédemment, d'une interface de communication sans fil (Wi-Fi ou ZigBee), d'un GPS, d'une interface pour faire le lien avec les autres composants. La présence d'un modem GPRS est également possible pour des applications nécessitant des communications longues distances.

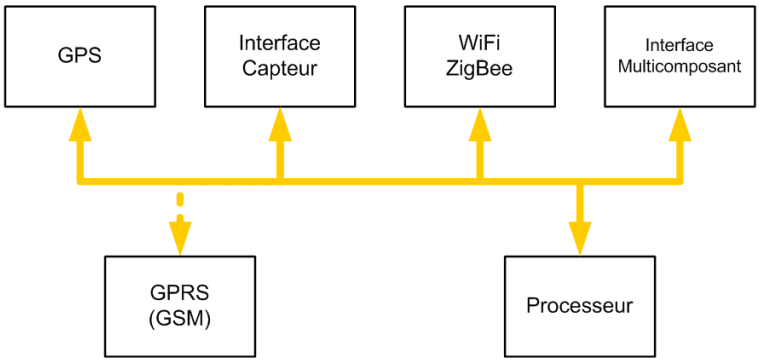

Figure 3.8 – Le schéma bloc d'un composant de base de e-CIVIC

Le principe de l'architecture multicomposants est d'offrir des extensions de fonctionnalités au module de base tout en lui conférant des propriétés de tolérance aux pannes. La Figure 3.9 montre un exemple d'association de composants.

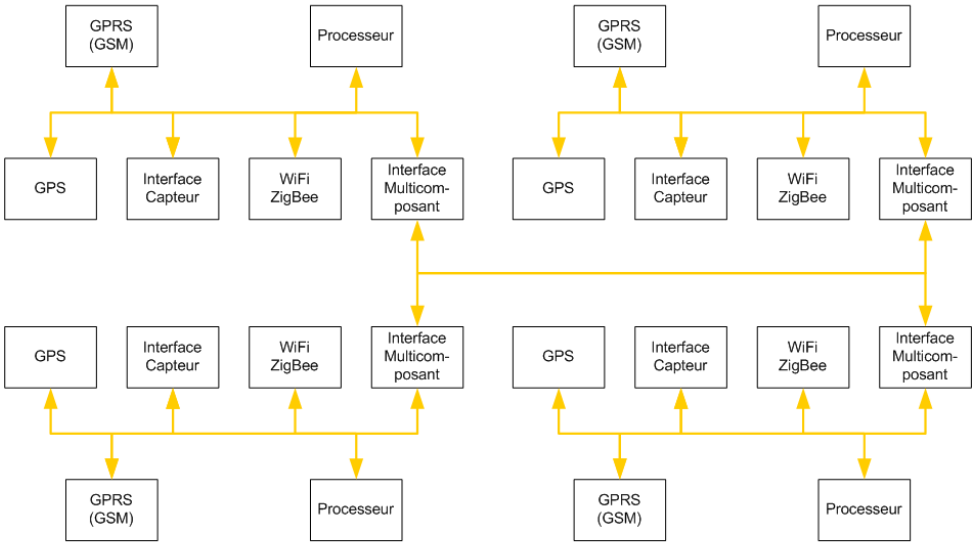

Figure 3.9 – Le principe d'un noeud e-CIVIC multisupport et tolérant aux pannes

Concrètement, un noeud e-CIVIC à deux composants a été réalisé. Ce noeud permet d'avoir la position via le GPS et possède deux supports de communication, un Wi-Fi et un ZigBee. De plus, il possède un conditionneur de signaux qui lui permet d'être connecté à des capteurs (comme des tensiomètres par exemple). De plus, il y a une redondance de ressources afin d'avoir la capacité d'être tolérant aux pannes. La Figure 3.10 présente les deux composants C1 et C2 du module selon leur face recto (R) et verso (V). Une seule pile de 9 V est suffisante pour assurer l'alimentation du noeud pendant plusieurs mois

pour l'acquisition de la mesure d'humidité du sol une fois par jour.

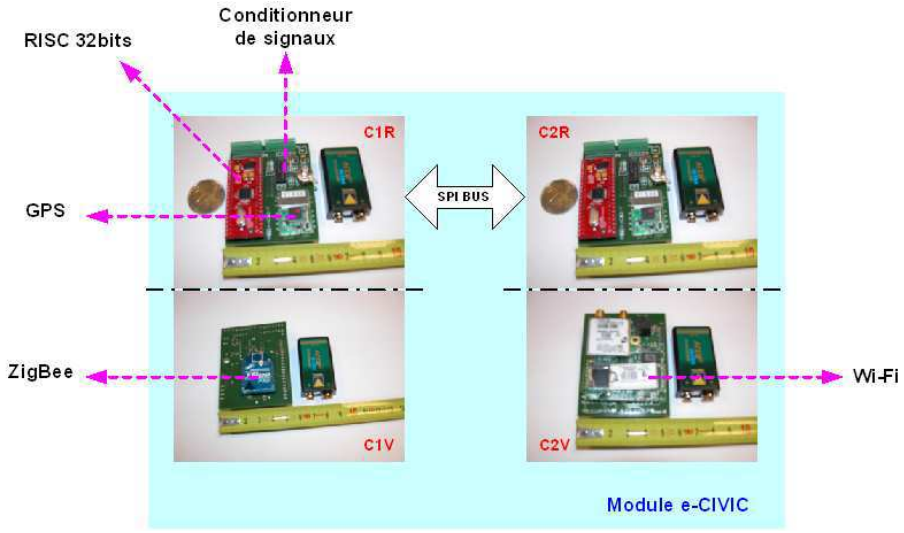

Figure 3.10 – Un module e-CIVIC avec deux composants

Afin d'assurer le fonctionnement des réseaux agri-environnementaux, un nouveau protocole est proposé, CIVIC, adapté au contexte agri-environnemental : il est de type hybride, géographique et avec un support de la QoS intégré. Ce protocole est intégré dans un micronoyau temps réel LIMOS. Cet ensemble permet de concevoir des noeuds basés sur une architecture multicomposants.

Une dimension importante du fonctionnement des réseaux agri-environnementaux est la QoS. Nous nous proposons de l'aborder suivant plusieurs approches complémentaires.

⋆⋆⋆⋆⋆⋆⋆

Chapitre 4

La Qualité de Service dans CIVIC

"Quality is never an accident; it is always the result of intelligent effort."
John Ruskin

Sommaire

4.1 La Qualité de Service dans les réseaux ad hoc 76
4.1.1 La Qualité de Service à différentes échelles 76
4.1.2 La détermination des paramètres de Qualité de Service dans les réseaux ad hoc 80
4.1.3 Synthèse 82
4.2 Le principe de la Qualité de Service dans CIVIC 83
4.2.1 Le multisupport 83
4.2.2 L'utilisation d'antennes directives 84
4.2.3 L'estimation de la bande passante 86
4.2.4 Le contexte du réseau 87
4.3 L'estimation de la bande passante 88
4.3.1 La mesure et le filtrage des RTT 88
4.3.2 L'estimateur de bande passante 90
4.3.3 Les performances de l'estimateur NIMBE 91
4.3.4 La mise en oeuvre de l'estimateur NIMBE 96

Un aspect important de la communication dans les réseaux agri-environnementaux est la QoS [Campillo 05]. En effet, dans le cas de systèmes de prévention de catastrophes naturelles, la fiabilité de la communication doit être irréprochable. Il faut donc développer des mécanismes garantissant le bon transport de l'information, malgré les faiblesses des réseaux sans fil (interférence, portée réduite, mobilité des noeuds, etc.) et permettant aux réseaux d'avoir des garanties de performances. Il existe de nombreuses solutions proposant d'améliorer la QoS dans les réseaux sans fil [Reddy 06]. Il convient donc de voir dans quelles mesures et sous quelles adaptations ces solutions peuvent être utilisées dans les réseaux agri-environnementaux.

Nous avons choisi de répondre aux besoins de QoS dans ces réseaux grâce à différentes approches, notamment par la mise en oeuvre d'un estimateur de bande passante original.

4.1 La Qualité de Service dans les réseaux ad hoc

4.1.1 La Qualité de Service à différentes échelles

La QoS correspond à des critères de performances que doit avoir le réseau pour satisfaire les besoins des utilisateurs. Ces performances correspondent à différents paramètres mesurables sur le réseau tels que [Park 05] :

- le délai de bout en bout : c'est le temps mis pour transférer un paquet entre deux noeuds ;
- la gigue : c'est la variation de l'intervalle de temps entre deux paquets durant leur acheminement entre la source et la destination ;
- la bande passante : c'est le volume total d'informations que peut absorber un lien entre deux noeuds sans créer de file d'attente ;
- la perte de paquets : c'est le nombre de paquets perdu par rapport au nombre de paquets émis.

En fonction des applications considérées, le paramètre à prendre en compte varie : par exemple, pour de la vidéo [Hurbain 03], les paramètres importants sont la bande passante, la gigue et le délai ; pour un échange de fichiers, il vaut mieux limiter la perte de paquets.

Cette problématique de QoS a été largement étudiée dans le cas des réseaux filaires. Dans ce type de réseaux, des équipements tels que les routeurs peuvent assurer le contrôle de la QoS en différenciant les paquets (certains sont prioritaires) ou en adaptant les routes suivies par les données en fonction des besoins à satisfaire. Mais, dans le cas des réseaux sans fil ad hoc, la problématique est complètement différente [Perkins 02]. En effet, il n'existe aucun élément du réseau pouvant s'occuper de la QoS. Cette fonction doit donc être distribuée. De plus, les conditions de transmission dans le réseau sont en constante évolution : mobilité des noeuds, médium radio peu fiable, changement brusque de la capacité d'échange des liens... Les ressources du réseau sont également plus limitées que

celles des réseaux filaires, notamment pour la bande passante ; il n'est donc pas possible de satisfaire les mêmes besoins que pour les applications de réseaux filaires.

La QoS dans les réseaux ad hoc peut être envisagée à différentes échelles (voir la Figure 4.1) :

- *interne* : intégration au niveau de la couche MAC du modèle OSI de chaque noeud du réseau ;
- *locale* : intégration au niveau du protocole de routage, c'est-à-dire dans le voisinage proche des noeuds du réseau ;
- *globale* : intégration de bout en bout entre la source et la destination au sein du réseau.

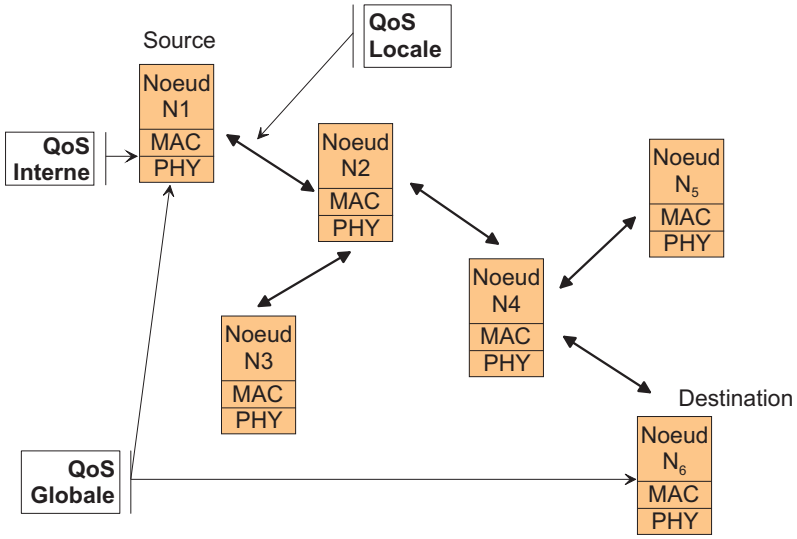

Figure 4.1 – Les différents niveaux d'approche de la QoS dans les réseaux ad hoc

La Qualité de Service dans les réseaux ad hoc à l'échelle interne

Cette approche gère le support de QoS au niveau de chaque station du réseau et plus particulièrement, sur la manière dont ces stations accèdent au médium radio, notamment au niveau de la couche MAC.

Dans le cas des standards IEEE 802.11, la QoS peut être améliorée en modifiant la méthode "DCF" d'accès au médium en jouant sur les temps d'attente (DIFS (DCF Inter-Frame Spacing) et SIFS (Short InterFrame Space)) [Aad 01] ou sur la fenêtre de contention des stations [Barry 01]. Elle peut également être améliorée en adaptant la taille maximale des trames utilisables par chaque noeud du réseau [Aad 01]. Il est aussi possible de différencier les flux au lieu des stations en jouant sur ces paramètres d'accès au médium [Kang 01].

Le standard IEEE 802.11 possède une extension, le IEEE 802.11e [Mangold 02], qui s'occupe de la QoS. Une nouvelle fonction de coordination, le HFC (Hybrid Function Coordination), est introduite par cette extension. Cette fonction est une combinaison des modes DCF et PCF à laquelle est ajouté un support de QoS basé sur la contention et la mise en file d'attente des trames pour l'accès aux canaux en tenant compte de la nature des flux. Il existe quatre catégories de différenciation des flux :

- priorité à la voix,
- priorité à la vidéo,
- priorité "Best Effort" pour les applications standards,
- priorité "Background" pour le trafic de moindre importance.

Mais cette gestion de la QoS nécessite soit la présence d'un point d'accès, soit celle d'une station gérant la QoS à proprement parler. Ceci rend ce mode de gestion moyennement distribué et pas forcément en phase avec un réseau ad hoc avec des noeuds mobiles.

Les travaux de recherche menés pour gérer la QoS dans les réseaux mobiles sont principalement axés sur le standard IEEE 802.11. Pour d'autres types de normes (tels que le ZigBee), les méthodes ne sont plus directement applicables car elles sont en fait des modifications du standard de base IEEE 802.11. De plus, cette approche de la QoS n'est pas compatible avec une approche multisupport car il faut, dans ce cas, gérer la QoS plus près des applications afin de pouvoir choisir le support le plus à même de satisfaire le service demandé.

Pour les réseaux agri-environnementaux, l'utilisation de différents supports de communication nécessite d'avoir un critère de choix entre ces différents supports : cela peut être le type de message, la capacité du support à l'instant considéré. Il faut être à même de pouvoir qualifier à tout moment les possibilités de chacun des supports.

La Qualité de Service dans les réseaux ad hoc à l'échelle locale

La QoS est ici abordée au niveau local, c'est-à-dire dans le voisinage immédiat des noeuds du réseau. Pour cela, les paramètres de QoS sont calculés en lien étroit avec les algorithmes de routage. Les protocoles de routage précédemment exposés ne cherchent qu'à obtenir une route entre la source et la destination ; dans le cas de solutions multiples, la route la plus courte en termes de nombre de sauts est le plus souvent choisie. Ce critère peut d'ailleurs être considéré comme un paramètre de QoS mais, somme toute, de pertinence limitée.

Dans cette approche locale de la QoS, un paramètre supplémentaire de QoS est ajouté aux routes possibles. Ce paramètre est calculé lors de la recherche des routes grâce principalement à l'échange des paquets de contrôle du protocole de routage. La concaténation de ces paramètres locaux donne une idée de la QoS entre la source et la destination.

Cette concaténation des métriques tout le long de la route est de plusieurs formes suivant le type de paramètres mesurés [Meraihi 05] :

- *additive* : les métriques locales sont sommées tout le long du chemin (cas par exemple du délai ou de la gigue) ;
- *concave* : seules les valeurs minimales de la métrique le long de la route sont retenues (comme pour la bande passante) ;
- *multiplicative* : les métriques sont multipliées entre elles le long du chemin (cas de la probabilité d'arrivée de paquets par exemple).

Pour choisir la route, la source se base sur la meilleure métrique afin de choisir la route la plus adaptée à ses besoins. Les protocoles de routage existants ont donc été adaptés afin d'intégrer cette dimension de QoS.

Une illustration de cette approche est le protocole QOLSR (QoS in ad hoc networks using OLSR) [Munaretto 03], qui propose d'ajouter deux métriques au protocole OLSR : le délai et la bande passante disponible [Badis 03]. Les paramètres sont déterminés à partir des temps de parcours des paquets "Hello" du protocole. Le calcul des paramètres de QoS n'ajoute donc pas de trafic sur le réseau.

Le protocole AODV dispose également de sa variante avec un support de la QoS [Perkins 01c], qui, comme pour le cas de QOLSR, utilise les paquets de contrôle du protocole (dans ce cas, ceux de recherche de route) pour calculer les paramètres de QoS.

Mais, au-delà de l'extension des protocoles de base, il existe également des solutions avec des protocoles orientés QoS dès leur conception, comme le protocole CEDAR (Core Extraction Distributed Ad hoc Routing) [Sivakumar 99]. Ce protocole est plutôt destiné aux réseaux de faible dimension et relativement stables car il est basé sur l'élection d'un noyau de réseau répondant aux exigences de QoS, comme dans le cas des réseaux filaires.

Il est également possible d'utiliser des protocoles de signalisation qui informent les noeuds de l'état de leurs voisins en termes de QoS. Ces protocoles de signalisation permettent également de faire de la réservation de bande passante en fonction des conditions du réseau. INSIGNIA [Lee 00], BRuIT [Chaudet 04] font partie de cette catégorie de protocole.

Pour les réseaux agri-environnementaux, il faut éviter de multiplier les protocoles car les ressources de certains noeuds en termes d'énergie, de mémoire sont très limitées (les capteurs par exemple). Tous les protocoles nécessaires au bon fonctionnement du réseau doivent être très peu gourmands en ressources. Le protocole de routage doit donc assurer les fonctions de routage et de QoS sans avoir à surcharger le réseau avec un protocole dédié à la QoS.

La Qualité de Service dans les réseaux ad hoc à l'échelle globale

Pour l'approche à l'échelle globale, c'est la totalité du chemin entre la source et la destination qui est ici considérée. Une route est déterminée de manière conventionnelle par un algorithme de routage et elle est caractérisée par des paramètres de QoS de bout en bout ou "End-to-End" [Chen 05] comme cela peut être réalisé dans les réseaux filaires classiques [Allman 99, Bolot 93].

Une fois la route évaluée, la source peut adapter l'émission en jouant sur la taille et la fréquence d'envoi des trames [Chen 99] ou en différenciant les flux en fonction d'un niveau de priorité [Nandagopal 99]. Cette adaptation peut être fixée une fois pour toutes pour une émission donnée ou bien être dynamique et évoluer au fil de l'émission en fonction du comportement des trames émises et reçues [Chen 99].

Les réseaux ad hoc étant par définition peu stables, il faut donc faire attention à l'estimation des paramètres de QoS dans ce type d'approche, surtout si le choix est d'avoir un comportement d'émission adaptatif. Les paramètres mesurés sont en effet très bruités et doivent absolument être filtrés pour pouvoir être utilisables. Il existe de nombreux travaux qui montrent les différentes formes de filtrage pouvant être pertinents dans le cas des réseaux ad hoc, comme par exemple dans [Kim 01, Grieco 03, Amamra 04].

4.1.2 La détermination des paramètres de Qualité de Service dans les réseaux ad hoc

Comme nous l'avons vu précédemment, il existe différents paramètres permettant de quantifier et de satisfaire les besoins de QoS des applications. Ces paramètres sont obtenus à partir de l'observation du comportement du réseau soit en injectant dans celui-ci des paquets de mesure, soit en utilisant les paquets liés au trafic des applications.

La première solution est invasive car un trafic de mesure est ajouté dans le réseau, mais, en revanche, les caractéristiques de ce flux de mesure sont totalement maîtrisées, ce qui permet une détermination plus fine des paramètres. Ces techniques sont largement utilisées dans le cas des réseaux filaires où la capacité est importante et permet au réseau de supporter ce flux de mesure. Il existe de nombreuses solutions de ce type mettant en jeu soit des paquets simples, soit des paires de paquets [Hu 03].

Dans les techniques mettant en jeu un seul paquet de mesure, ce paquet est émis de manière régulière et la technique de mesure consiste à observer l'évolution du temps de parcours de ce paquet entre la source et la destination ou le temps d'aller-retour de ce paquet (source-destination-source), ce qui est couramment appelé le RTT (Round-Trip Time) (voir la Figure 4.2). Le délai peut ainsi être estimé de bout en bout ainsi que la

bande passante et le taux de perte de paquets. *Pathchar*[20], *Pchar*[21], *Clink*[22], sont des méthodes de ce type.

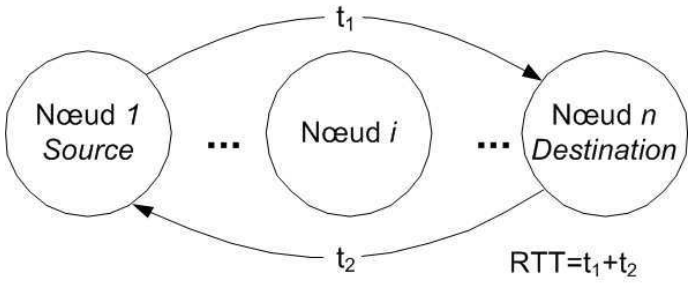

Figure 4.2 – La définition du RTT

Dans les méthodes de mesure incluant plusieurs paquets, deux ou plusieurs paquets sont envoyés de manière régulière. Ceci permet d'avoir les mêmes paramètres que les techniques précédentes mais également d'évaluer la gigue. En revanche, un trafic plus important est généré. *Bprobe* [23] et *Nettimer* [24] sont des outils de mesure de ce type.

La seconde solution consiste à utiliser les trames échangées sur le réseau pour évaluer les performances de celui-ci. Un champ peut éventuellement être ajouté (le temps par exemple) aux trames afin d'avoir les données nécessaires pour déterminer les paramètres de QoS. C'est ici le même principe que lors de l'utilisation des messages de routage afin de déterminer les performances des liens voisins. Ce type de solution peut être implémenté au niveau des applications qui gèrent elles-mêmes la mesure et son adaptation aux conditions du réseau en modifiant leurs paramètres d'émission [Chen 99]. Mais la gestion de cela peut se faire au niveau de la couche MAC en utilisant les temps d'émission des trames de données et leur accusé de réception [Shah 05].

Dans tous les cas, la mesure des performances du réseau revient à déterminer des temps de parcours de paquets de tailles variables. Il faut donc bien faire attention à la mesure des temps de parcours entre deux noeuds du réseau : il faut que les horloges de ceux-ci soient bien synchronisées afin de ne pas commettre d'erreurs de mesure. C'est pour cela que bien souvent le RTT est utilisé pour effectuer les mesures car, dans ce cas, les temps sont déterminés sur la même station et il n'y a donc pas de problème de synchronisation du réseau.

[20] `http://www.caida.org/tools/utilities/others/pathchar/`
[21] `http://www.kitchenlab.org/www/bmah/Software/pchar/`
[22] `http://allendowney.com/research/clink/`
[23] `http://cs-people.bu.edu/carter/tools/Tools.html`
[24] `http://www.mdsware.com/`

4.1.3 Synthèse

La question de la QoS dans les réseaux ad hoc peut être abordée à différentes échelles : interne, locale et globale. Pour garantir la QoS, il faut, dans tous ces cas, mesurer différents paramètres caractéristiques des performances du réseau tels que la bande passante disponible, le délai de transmission et la perte de paquets.

Dans le cas d'une approche interne, il faut, comme nous l'avons vu, modifier les couches internes de la pile de protocoles, comme la couche MAC par exemple. Cela peut être pénalisant si nous souhaitons rester conforme aux standards existants. L'approche locale est directement liée à l'environnement immédiat du noeud et semble donc pertinente car, quel que soit le protocole de routage utilisé, un noeud dialogue beaucoup avec ses voisins à portée radio ; il est donc possible d'avoir beaucoup de mesures de paramètres de QoS en utilisant les messages de contrôles, sans surcharger le réseau avec un trafic dédié à la mesure. L'approche globale est également intéressante car elle renseigne directement l'application de la capacité de la route à assurer le service nécessaire. Il faut malgré tout être vigilant sur le calcul des métriques sur l'ensemble du chemin, du fait de leur évolution rapide.

L'utilisation des mesures de performances du réseau peut également prendre plusieurs formes : directement au niveau des applications, au sein même du protocole de routage, ou encore à travers un protocole de signalisation dédié à la QoS.

Les réseaux agri-environnementaux étant constitués de différents type de noeuds (capteurs, véhicules, etc.), il faut donc avoir une approche de la QoS la plus large possible en intégrant toute les dimensions (interne, locale, globale) précédemment définies. Il faut également prendre en compte la propagation des signaux qui, du fait des irrégularités des ondes électromagnétiques, a une grande influence dans la QoS d'un réseau sans fil.

La QoS dans un réseau ad hoc dépend donc de nombreux facteurs :
- la capacité d'échange du réseau, c'est-à-dire la bande passante disponible pour l'échange de données ;
- la qualité des signaux radio, comme la présence ou non d'interférences, la portée des ondes, etc. ;
- la plus ou moins grande mobilité des noeuds, ce qui entraîne une stabilité du réseau variable ;
- l'existence de routes fiables entre les émetteurs et les récepteurs de message, etc.

Au sein du protocole CIVIC, nous avons choisi de prendre en compte le maximum de ces facteurs afin d'augmenter la QoS suivant toutes ces dimensions.

4.2 Le principe de la Qualité de Service dans CIVIC

Comme nous l'avons vu précédemment, la QoS dans les réseaux ad hoc est souvent appréhendée à une échelle donnée, soit au niveau du noeud lui-même, soit dans son voisinage immédiat ou bien à l'échelle du réseau. Dans le protocole CIVIC, nous avons choisi une approche de la QoS qui peut être qualifiée de multi-échelles.

Tout d'abord, à l'échelle interne, nous utilisons plusieurs technologies radio afin de pouvoir faire un choix en fonction des capacités de chacun des médias. Toujours au niveau du noeud lui-même, nous privilégions l'utilisation d'antennes directives afin de limiter les interférences et afin d'augmenter la portée des signaux : ceci augmente la connectivité du réseau et indirectement la QoS.

Au niveau local, nous avons choisi de développer un estimateur non invasif de la bande passante disponible, permettant de choisir au mieux les caractéristiques d'émission du noeud.

Enfin, à l'échelle globale, des informations de contexte sur le réseau sont prises en compte afin d'améliorer encore la QoS, en intégrant notamment la mobilité des noeuds et leur position géographique.

Ces paramètres de QoS sont maintenant présentés plus en détail.

4.2.1 Le multisupport

Le multisupport consiste à utiliser plusieurs technologies radio afin qu'un noeud puisse choisir le support le plus adapté en fonction du type d'informations à envoyer, du contexte, de la bande passante disponible au moment de l'émission. Cette redondance des moyens de communication permet d'améliorer la QoS à l'échelle interne, au niveau du noeud lui-même.

Pour les modules e-CIVIC, les supports retenus sont le ZigBee et le IEEE 802.11b. Ces deux technologies sont complémentaires car elles permettent aux noeuds du réseau de disposer d'un support avec une grande bande passante et un autre consommant peu d'énergie (voir la section 2.1.3 page 26). Un noeud peut ainsi adapter son émission en fonction de ses besoins en termes de bande passante (le Wi-Fi est privilégié pour les gros volumes de données) ou en termes de ressources (le ZigBee peut être utilisé de préférence quand le niveau de batterie du noeud est faible). Cette complémentarité permet de concevoir des réseaux hétérogènes avec des noeuds multisupport et des noeuds monosupport : par exemple un champ peut être équipé de capteurs en réseau supportant le ZigBee pour des raisons de consommation énergétique, ces capteurs communiquant avec un noeud central multisupport qui assure le relais des informations capteurs vers le reste du réseau et ce jusqu'à l'exploitation agricole.

L'architecture multicomposant des modules e-CIVIC permet en outre de mettre en oeuvre ces différents supports de manière transparente. De plus, si le noeud possède plusieurs supports, cela lui permet d'avoir une tolérance aux pannes et aux perturbations extérieures (les deux supports n'émettant pas dans la même bande de fréquence). L'utilisation d'autres types de supports est également envisageable en fonction des évolutions technologiques des normes radios (arrivée du IEEE 802.11n par exemple).

4.2.2 L'utilisation d'antennes directives

Toujours à l'échelle interne du noeud, l'utilisation d'antennes directives peut améliorer indirectement la QoS en améliorant la connectivité et la bande passante au sein du réseau. En effet, il existe plusieurs types d'antennes : les *omnidirectionnelles* et les *directives*. Les premières rayonnent dans tout l'espace autour d'elles de manière équivalente. Les secondes privilégient une ou quelques orientations. Donc, à puissance d'émission équivalente, les antennes directives offrent une plus grande portée, mais dans une zone de l'espace plus restreinte [Krishnamurthy 05]. La Figure 4.3 montre la différence de portée entre les deux types d'antennes. Les antennes directives présentent une direction privilégiée (lobe principal) mais il y a toujours des zones secondaires car la réalisation des antennes n'est pas parfaite et le rayonnement ne peut pas être contenu dans une seule zone. Par l'utilisation d'antennes adaptées, il est possible d'augmenter la portée radio des noeuds et donc d'augmenter leur connectivité, cela se répercutant directement sur la QoS.

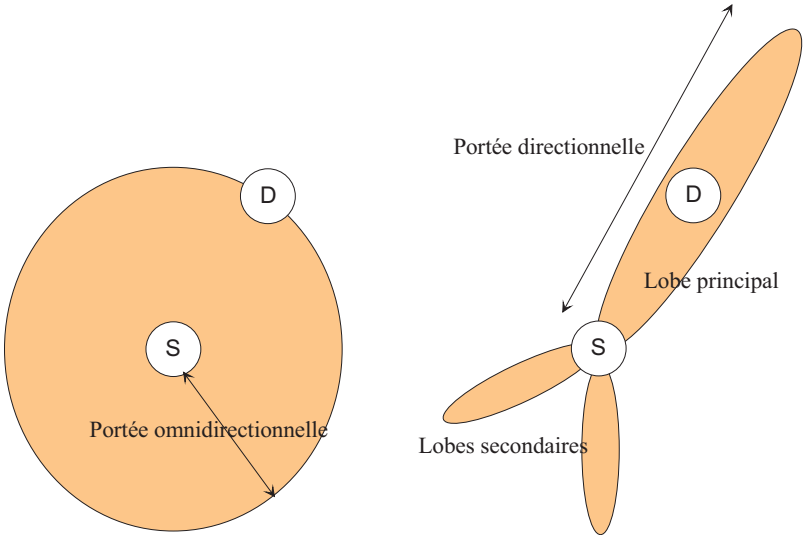

Figure 4.3 – Différence de portée entre antenne omnidirectionnelle et directive

Dans le cas du protocole CIVIC, l'utilisation des antennes directives est facilitée par la prise en compte de la position géographique des noeuds dans le protocole. Cette information peut servir à orienter une antenne directive dans la bonne direction de

propagation des messages. Différents travaux de simulation ont montré que l'utilisation de ce type d'antenne dans les réseaux ad hoc permettait d'améliorer le routage [Dai 06, Joshi 05, Saha 04]. L'utilisation d'antennes directives permet de limiter les répétitions de message dans des directions inutiles, donc de réduire la consommation de bande passante et en plus d'optimiser la consommation énergétique [Dai 06]. Mais les antennes directives semblent être moins performantes dans le cas de réseau très dense où les antennes omnidirectionnelles exploitent mieux le nombre important de noeuds [Choudhury 05]. En revanche, dans les réseaux peu denses, les antennes directives augmentent les performances et la QoS : les réseaux agri-environnementaux étant de ce type, l'utilisation d'antennes directives est donc bien adaptée.

La mise en oeuvre d'antennes directives dans un réseau peut être envisagée de différentes façons. Une première solution consiste à utiliser plusieurs antennes directives orientées dans différentes régions de l'espace [Ramanathan 05] : chaque véhicule est équipé d'une antenne chargée des émissions pour un secteur angulaire donné (voir la Figure 4.4). Ce type d'approche nécessite de modifier la couche MAC de la pile TCP/IP, car il faut pouvoir activer la bonne antenne en fonction de la direction d'émission voulue [Korakis 03]. Les résultats obtenus par Ramanathan et al. montrent que les performances du réseau sont meilleures qu'avec l'utilisation d'antennes omnidirectionnelles [Ramanathan 05].

Figure 4.4 – Réseau de véhicules équipés d'antennes directives [Ramanathan 05]

La seconde solution est de n'utiliser qu'une seule antenne directive mais de l'orienter en fonction de la direction d'émission voulue. Ce type de système nécessite de connaître la position de l'antenne. Des travaux ont été menés dans ce sens sur des robots mobiles spatiaux [Bapna 98]. Les noeuds CIVIC étant équipés d'un GPS, c'est cette solution qui a été retenue pour la mise en oeuvre d'antennes directives pour améliorer la QoS du réseau.

Dans le cas des réseaux agri-environnementaux, les solutions hétérogènes (mélange de technologies radios) sont bien adaptées. Les réseaux de capteurs présents sur les parcelles peuvent être conçus avec un seul type de support comme le ZigBee qui consomme peu d'énergie. Les engins évoluant sur les parcelles sont, quant à eux, équipés de plusieurs supports (ZigBee + Wi-Fi) et possèdent une antenne directive asservie, pouvant être orientées vers la direction du MMRS le plus proche. La collecte des données du réseau présentes sur la parcelle peut ainsi être effectuée via un noeud passerelle mobile possédant une portée importante grâce à l'utilisation de son antenne directive.

La réalisation et la mise en oeuvre de ces antennes originales seront exposées dans le chapitre 5.

4.2.3 L'estimation de la bande passante

Comme cela a été présenté dans la section 4.1 page 76, la QoS dans les réseaux ad hoc est une problématique complexe. Mais, comme pour les réseaux filaires, elle est basée sur la détermination de métrique telle que l'estimation de la bande passante. Cette estimation est importante car elle peut conditionner le comportement du noeud dans sa gestion de l'émission de ses messages et donc influer sur les performances globales du réseau [Chen 99].

La clé pour améliorer la QoS est une bonne estimation de la capacité du réseau. Différentes techniques sont utilisées, mais la plus répandue est l'utilisation de la mesure des RTT, après avoir filtré les valeurs instantanées [Amamra 04, Kim 01]. Une fois cette valeur mesurée, des estimateurs de bande passante sont proposés tels que celui de l'équation 4.1 [Legout 00, Vicisano 98] :

$$\overline{BW_k} = \frac{Cp_{size}}{\overline{RTT_k}\sqrt{p_{loss}}} \tag{4.1}$$

où p_{size} est la taille des paquets, $\overline{RTT_k}$ la mesure de RTT filtrée à l'instant k et p_{loss} le taux de perte de paquets. C est une constante prenant en compte le contexte du réseau. L'estimation de cette constante C est difficile car elle est fonction du réseau : elle peut varier de 0,87 à 1,31 [Widmer 00]. Lorsque le réseau est de type ad hoc, c'est-à-dire que la topologie du réseau peut changer à tout moment, la détermination de C devient problématique.

Un estimateur intitulé NIMBE (Non Invasive MANET Bandwidth Estimator) est donc proposé et est explicité dans la section suivante. Cet estimateur est non invasif car il s'appuie sur les messages de contrôle du protocole pour déterminer les RTT. L'utilisation de cet estimateur est également présentée.

4.2.4 Le contexte du réseau

Le contexte du réseau est une approche à l'échelle globale de la QoS. Dans le protocole CIVIC, cette notion de prise en compte du contexte est présente sous différentes formes. La première est basée sur l'introduction de la notion géographique (via des GPS) au sein du protocole. Le fait d'orienter l'émission des messages vers la destination permet de limiter la diffusion dans le réseau et donc d'augmenter la QoS.

La prise en compte du contexte est également réalisée par le fait que les noeuds du réseau ont une connaissance de certaines caractéristiques physiques du réseau, comme par exemple la position des MMRS ($Next_MMRS_Destination$). Les noeuds savent également dans quel lieu géographique ils se trouvent via l'identifiant $Road_Number$.

L'utilisation de GPS permet également à chaque noeud de connaître sa vitesse et donc de savoir si la stabilité des liens avec les autres noeuds est forte ou faible. Si le noeud se déplace vite dans le réseau, la stabilité est faible et il doit remettre à jour fréquemment les données des tables de routage. En revanche, si le noeud bouge peu (ou pas), la fréquence de mise à jour des informations est réduite et le trafic diminue dans le réseau, donc la QoS augmente. De plus, les noeuds peuvent coopérer afin d'améliorer leur propre position en intégrant les données GPS de leurs voisins afin de minimiser les erreurs de positionnement liées à la précision des GPS [Kara 06].

De plus, le protocole CIVIC cherche à minimiser le fonctionnement ad hoc du réseau en essayant toujours de joindre le MMRS le plus proche et, ce, de la façon la plus rapide via la mise en compétition des noeuds dans le relais de l'information, afin de délester au maximum le trafic sur la partie ad hoc du réseau et de le reporter sur la partie infrastructure. Cela contribue bien évidemment à augmenter la QoS du réseau en délestant au maximum la charge de travail des noeuds dans le relayage de l'information.

4.3 L'estimation de la bande passante

Un nouvel estimateur de bande passante est proposé dans cette section à partir de la mesure des temps de parcours de paquets. Cet estimateur est non invasif. Il est donc particulièrement adapté aux réseaux sans fil qui doivent optimiser l'usage de la bande passante. Il se nomme NIMBE (Non Invasive MANET Bandwidth Estimator) [Chanet 06b].

L'estimateur NIMBE est calculé à partir de l'observation des temps d'aller-retour de paquets entre deux noeuds, c'est-à-dire les RTT. Dans la suite de cette section, l'utilisation des RTT est explicitée, puis l'estimateur NIMBE est présenté et ses performances sont évaluées.

4.3.1 La mesure et le filtrage des RTT

Pour estimer la bande passante dans CIVIC, les RTT sont utilisés. Ce paramètre est le temps mis par un paquet pour aller de la source à la destination et pour revenir (voir la Figure 4.2). L'avantage de ce paramètre est principalement la possibilité de l'utiliser dans des réseaux non synchronisés temporellement. En effet, les mesures de temps sont effectuées sur le même noeud. Pour obtenir une valeur de RTT, le noeud source envoie un paquet contenant l'heure d'envoi t_{Snd_Time}. Le noeud destination répond en faisant un écho du message original. L'heure d'arrivée, t_{Rcv_Time}, du message écho sur la source permet de calculer la valeur de RTT : $RTT = t_{Snd_Time} + t_{Rcv_Time}$. Le calcul du RTT peut se faire entre deux noeuds voisins, mais peut également se faire entre des noeuds distants de plusieurs sauts.

Les paquets ont une taille fixe (p_{size}) et sont émis suivant une fréquence d'émission donnée f_e. La Figure 4.5 montre un exemple de courbe obtenue pour 1000 paquets ($p_{size} =$ 84 octets) et émis à une fréquence $f_e = 4$ Hz. La source et la destination sont deux ordinateurs type PC sous Windows XP équipés de carte Wi-Fi IEEE 802.11b.

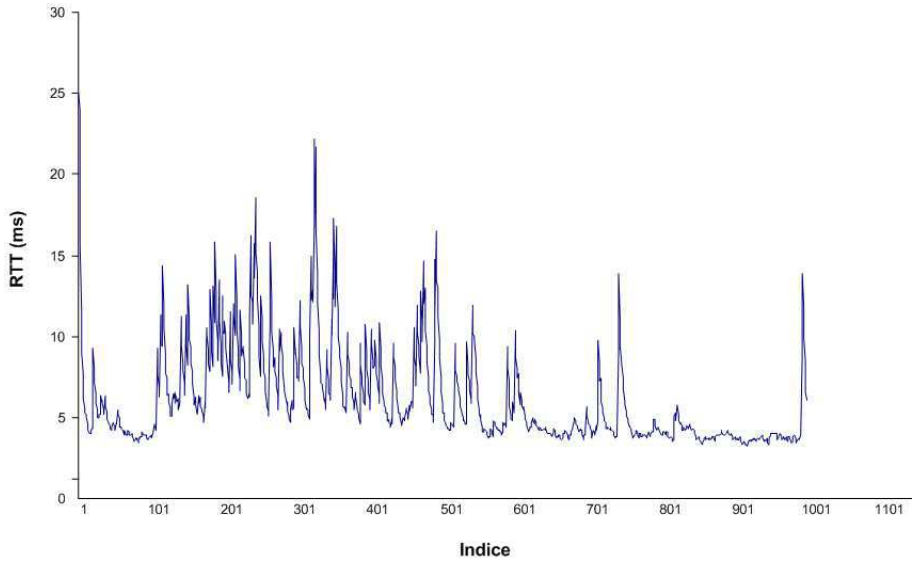

Figure 4.5 – Un exemple de mesure de RTT

La mesure des RTT est bruitée. La Figure 4.5 montre un signal déjà relativement bruité, bien qu'il n'y ait aucun trafic entre les deux noeuds, hormis celui pour la mesure des RTT. Si le trafic augmente, la mesure devient alors excessivement parasitée et son exploitation nécessite un filtrage.

Beaucoup de techniques de filtrage ont été implémentées pour les RTT, mais celle qui semble donner les meilleurs résultats est l'utilisation d'un filtre EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) [Amamra 04, Kim 01].

Le filtre EWMA est explicité par l'équation 4.2, où $\overline{RTT_k}$ est la valeur filtrée de RTT à l'instant k (et $\overline{RTT_{k-1}}$ à l'instant précédent), RTT_k est la valeur observée de RTT à l'instant k et $\lambda \in [0,1]$ est le gain du filtre. Si λ est proche de 1 le filtre est stable (les nouvelles observations ont peu d'influence) et si λ est proche de 0, le filtre est agile (les nouvelles valeurs influent fortement la valeur filtrée).

$$\overline{RTT_k} = \lambda \overline{RTT_{k-1}} + (1-\lambda) RTT_k \tag{4.2}$$

Dans les réseaux sans fil de type MANET, beaucoup de paquets sont perdus à cause des interférences, de la mobilité des noeuds. Afin de prendre en compte ce fait, une adaptation du gain λ est mise en oeuvre. Si des paquets sont perdus, le gain diminue et, inversement, si aucun paquet n'est perdu, λ augmente. Ce gain adaptatif permet au filtre de devenir de plus en plus agile lorsque des paquets sont perdus, il peut ainsi réagir plus rapidement quand des paquets arrivent à nouveau. Quand il n'y a pas de paquets de mesure de RTT, le $\overline{RTT_k}$ ne peut être estimé, mais cela revient à considérer que le paquet attendu a

beaucoup de retard ; aussi, à chaque paquet perdu, le $\overline{RTT_k}$ est incrémenté d'une valeur constante $T = 5$ ms.

Cette prise en compte des paquets perdus nécessite d'inscrire un numéro de séquence dans les paquets en plus de l'heure d'émission afin de bien différencier les paquets.

Cette mesure de $\overline{RTT_k}$ peu être utilisée pour avoir un estimateur de la bande passante disponible.

4.3.2 L'estimateur de bande passante

L'estimateur de bande passante NIMBE se propose de déterminer la bande passante disponible $\overline{BW_k}$ à un instant k en fonction des mesures de RTT. L'équation 4.3 montre la définition de l'estimation de la bande passante $\overline{BW_k}$ à l'instant k proposée.

$$\overline{BW_k} = BW_{max}(1 - \frac{1}{\exp(\frac{2p_{size}}{\overline{RTT_k} - RTT_{min}})^2}) \tag{4.3}$$

où BW_{max} est la valeur maximale de bande passante utile disponible dans le réseau, en fonction de la technologie utilisée (par exemple 5,7 Mb/s pour un médium IEEE 802.11b), $\overline{RTT_k}$ est la version filtrée des mesures de RTT à l'instant k et RTT_{min} est la valeur de RTT minimale du lien lorsqu'il n'y a aucun trafic. La variable p_{size} correspond à la taille des paquets utilisés pour la mesure.

Si la valeur BW_{max} est inconnue, l'estimateur est calculé en pourcentage de la bande passante totale disponible en fixant $BW_{max} = 100$.

La Figure 4.6 montre l'estimation de bande passante obtenue avec NIMBE et celle obtenue avec l'estimateur de référence (voir équation 4.1 page 86) de la littérature sur une même séquence de mesure de RTT.

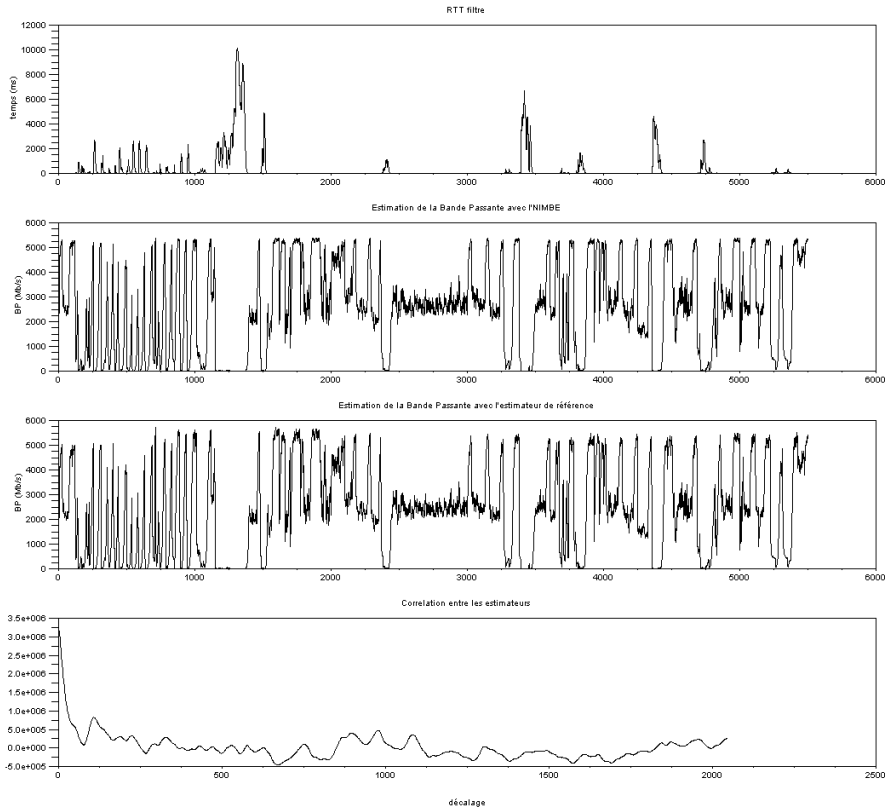

Figure 4.6 – Les résultats de NIMBE

La première courbe montre le résultat du filtrage des mesures de RTT, la seconde courbe superpose l'estimation de bande passante de NIMBE, la troisième celle de l'estimateur de référence. Le dernier graphe montre le résultat de la corrélation entre les deux estimateurs et permet de constater qu'ils sont similaires. L'avantage de NIMBE par rapport aux autres estimateurs est qu'il ne dépend pas des conditions du réseau. Ces conditions sont rassemblées dans les estimateurs sous la forme d'une constante (voir équation 4.1 page 86) qui est difficile à déterminer et peut changer en fonction des évolutions du réseau (nouveaux noeuds par exemple).

4.3.3 Les performances de l'estimateur NIMBE

Afin de valider complètement l'estimateur NIMBE, il convient de le confronter à des flux de valeurs connues. Pour cela, trois ordinateurs de type PC sous Windows XP sont mis en oeuvre. Deux des PC sont clients d'un serveur : le premier envoie vers le serveur des flux UDP (User Datagramme Protocol) de taille connue ; le second client mesure la bande passante disponible à l'aide de l'estimateur NIMBE décrit précédemment. Chaque ordinateur est équipé d'une carte réseau IEEE 802.11b et fonctionne en mode ad hoc (sans protocole de routage). La Figure 4.7 résume le scénario. Les paquets servant à mesurer

les RTT sont de 1024 octets et la période de mesure est de 100 ms.

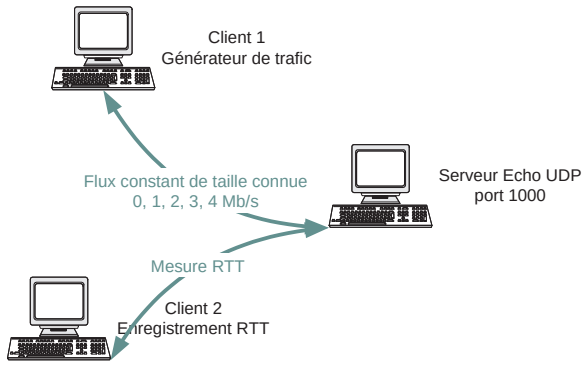

Figure 4.7 – Le protocole de validation de NIMBE

Toutes les 100 s le client 1 augmente la valeur du flux UDP de 1 Mb/s, passant ainsi de 0 à 4 Mb/s. La Figure 4.8 montre les résultats obtenus pour les RTT filtrés et pour l'estimateur de bande passante NIMBE $\overline{BW_k}$. Lorsque le flux devient important par rapport à la bande passante disponible (3 ou 4 Mb/s pour une capacité de 5,7 Mb/s), le nombre de paquets perdus augmente de manière importante : lorsque le flux UDP est de 4 Mb/s, le taux de perte mesuré des paquets de mesure de RTT est de 51 %.

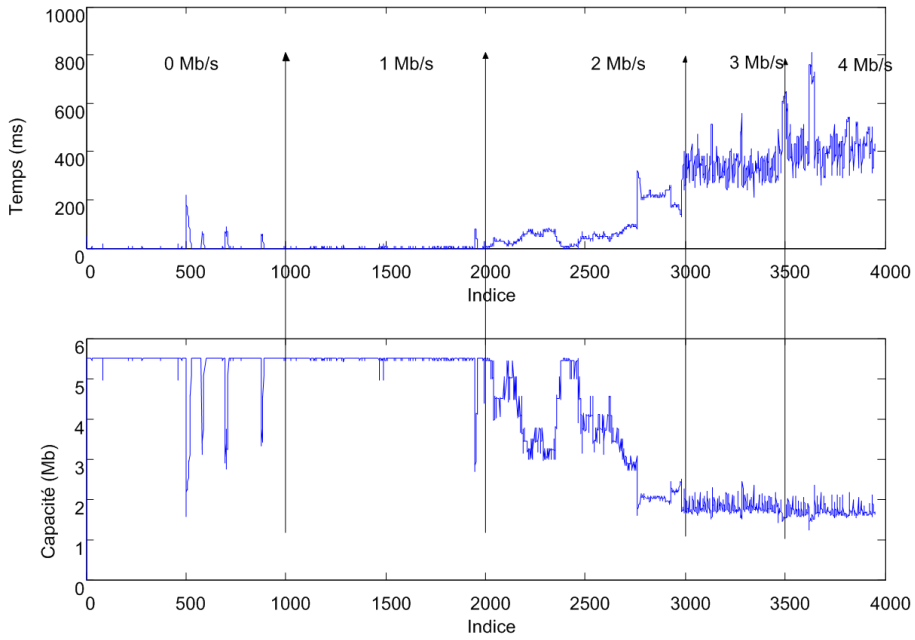

Figure 4.8 – Les résultats de NIMBE pour des flux UDP connus

L'estimateur NIMBE étant destiné à évaluer la capacité des réseaux ad hoc, il faut valider ce dernier dans ce contexte. Afin de bien différencier les questions de routage de celles de l'estimation, le choix a été fait de valider NIMBE avec un protocole normalisé : OLSR (voir le paragraphe page 29). Le protocole OLSR étant proactif, il y a toujours un trafic de contrôle sur le réseau ; l'utilisation de NIMBE permet donc d'évaluer l'importance de ce trafic en fonction de l'augmentation du nombre de noeuds. L'implémentation de OLSR choisie est celle de Tønnesen [Tønnesen 04] : "olsrd"[25]. Afin de voir l'influence du nombre de noeuds, le taux de fréquence des mesures et la taille des paquets de mesure sur les performances du réseau, un scénario faisant évoluer ces paramètres a été retenu :

- 3 tailles de paquets ont été utilisées (32, 64, 128 octets),
- 5 périodes d'émission de paquets (100, 250, 500, 750, 1000 ms),
- 3 configurations de réseau (1, 2, 3 sauts).

L'expérimentation a été réalisée en intérieur avec quatre ordinateurs de type PC sous Windows XP avec des cartes IEEE 802.11b. Il n'y avait toujours qu'une route pour joindre la source et la destination. Le noeud source exécute un programme client développé pour le calcul et la sauvegarde des RTT (voir la Figure 4.9) et, sur le noeud destination, un serveur "écho" est exécuté renvoyant le paquet à la source. Pour chaque jeu de paramètres, 1000 paquets sont émis et $\overline{RTT_k}$ et $\overline{BW_k}$ sont calculés.

Figure 4.9 – L'interface utilisateur du client pour la mesure des RTT

[25] `http://www.olsr.org`

Les résultats de cette expérimentation montrent que :
- quand la taille des paquets augmente, la capacité du réseau diminue ;
- quand la fréquence d'émission augmente, la capacité du réseau diminue ;
- quand le nombre de sauts augmente, la capacité du réseau diminue ; lors du passage de 2 à 3 sauts entre la source et la destination, la capacité diminue de l'ordre de 10 % (voir la Figure 4.10).

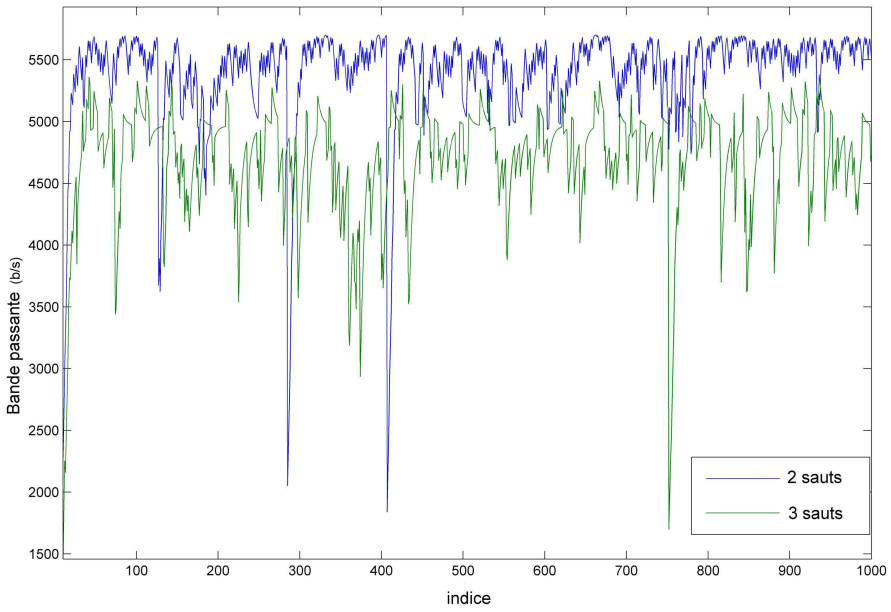

Figure 4.10 – L'influence du nombre de sauts sur la bande passante disponible

Ces résultats montrent qu'il faut faire les mesures de RTT avec des paquets de petites tailles et des fréquences pas trop élevées afin de ne pas perturber le fonctionnement du réseau. Le nombre de sauts a également une forte influence sur les performances du réseau : diminution de la bande passante disponible, mais aussi augmentation du taux de perte de paquets quand le nombre de sauts augmente (2 à 10 % pour aucun saut et de 20 à 50 % dans le cas de 3 sauts).

Dans le cas du protocole CIVIC, chaque noeud possède un GPS ou a accès à un noeud qui en possède un : le réseau est donc synchronisé vis-à-vis du temps. Pour estimer la bande passante disponible, le OTT (One-way Trip Time) peut être utilisé. Cette méthode de mesure accroît la bande passante disponible parce qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un paquet de retour comme dans le cas de la mesure des RTT. Cette technique est donc bien adaptée au flux UDP. L'estimation de la bande passante peut même dans ce cas être intégrée au message de contrôle du protocole de routage (message HELLO par exemple).

Dans ce cas, l'équation 4.3 page 90 de NIMBE devient 4.4 page suivante :

$$\overline{BW_k} = BW_{max}(1 - \frac{1}{\exp(\frac{2p_{size}}{\overline{OTT_k} - OTT_{min}})^2}) \quad (4.4)$$

Pour valider l'estimateur NIMBE basé sur les OTT, il a été intégré directement au sein du protocole de routage OLSR dans la version de Tønnesen. Cette implémentation présente l'avantage de pouvoir accepter des évolutions sous la forme de "plugins". En effet, le protocole est conçu de telle sorte que les messages sont filtrés via les analyseurs de paquets ("parser") et dirigés vers les bonnes entrées (le protocole lui-même ou le plugin). Une fois le traitement lié au plugin réalisé, le "scheduler" du protocole est utilisé pour émettre les messages liés au plugin développé. Un plugin NIMBE a donc été développé afin d'estimer la bande passante disponible entre deux noeuds. Ce plugin permet de mesurer les OTT (le réseau est synchronisé) entre les noeuds en utilisant des messages de contrôle périodiques comme ceux du protocole (Hello, TC...) et également de déterminer le taux de perte de paquets afin d'adapter le gain du filtre EWMA pour les valeurs de OTT.

Le réseau de quatre ordinateurs précédemment utilisé a été repris. Les noeuds utilisent tous le protocole OLSR et le plugin de QoS. Les messages de mesure de QoS sont envoyés toutes les 2,5 s. Au bout de 110 s, un flux UDP de 2 Mb/s est émis par le noeud 1 vers le noeud 4 (3 sauts). Les mesures effectuées via l'estimateur NIMBE entre le noeud 2 et le noeud 3 sont présentées sur la Figure 4.11 (courbe pointillée). La courbe en trait plein représente la même mesure sans trafic UDP. L'arrivée du flux UDP est bien détectée par l'estimateur NIMBE.

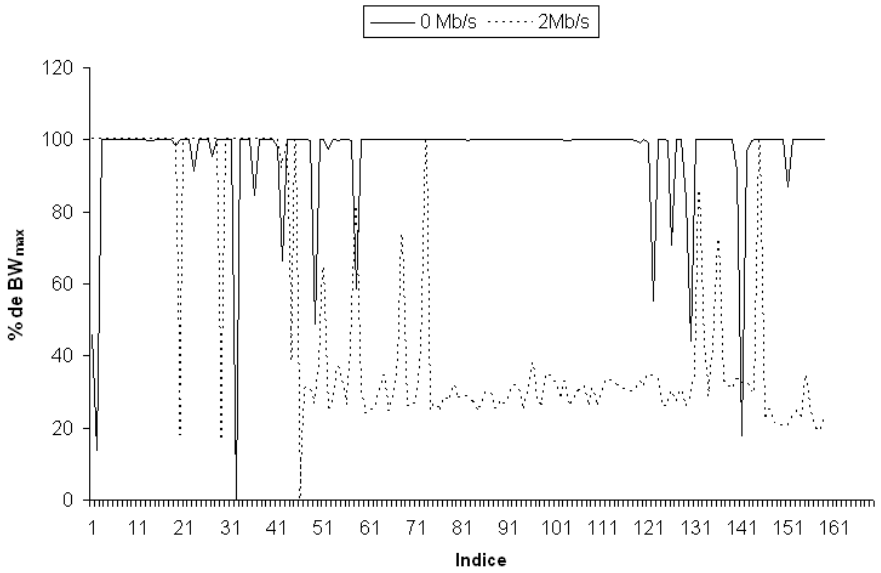

Figure 4.11 – L'estimation de la bande passante dans un réseau ad hoc

L'estimateur NIMBE ayant été présenté et validé, la question qui se pose maintenant est celle de son utilisation au sein du protocole CIVIC et de la prise en compte de cette estimation pour l'émission des messages.

4.3.4 La mise en oeuvre de l'estimateur NIMBE

Grâce à NIMBE, la bande passante disponible est connue par chaque noeud. Chaque noeud peut donc adapter ses paramètres d'émission (taille de paquet, fréquence) en fonction de la capacité du réseau. Cette adaptation permet de prévenir un effondrement du réseau et de l'éviter. Afin de réaliser cette émission adaptative, les messages sont triés et placés dans différentes files d'attente et, en fonction des résultats de l'estimateur NIMBE, un automate sélectionne le type de message à envoyer (voir la Figure 4.12). Les files peuvent différencier les messages en fonction de leur taille ou de la nature même de leur contenu ou de leur caractère d'urgence.

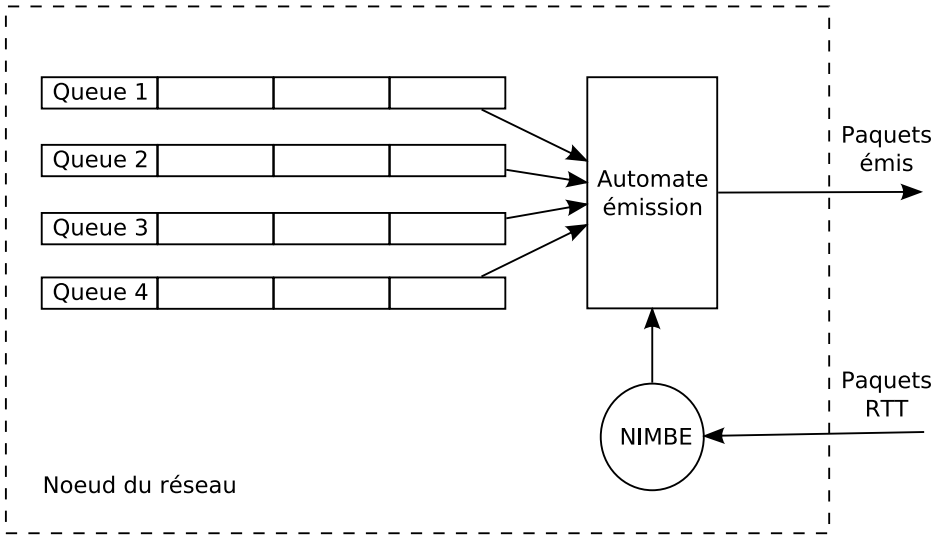

Figure 4.12 – Le principe de mise en oeuvre de NIMBE

L'automate proposé se compose de quatre états correspondant à quatre capacités du réseau : C_i avec $i \in \{0, 1, 2, 3\}$. Les C_i sont fonction de la valeur de NIMBE, $\overline{BW_k}$ et du taux de perte de message, p_{loss}. Quand C_i atteint un seuil s_i, les conditions d'émission changent et l'automate change d'état, privilégiant une autre politique d'émission de message.

Quand un noeud entre dans le réseau, le processus d'émission de message commence par le niveau le plus bas E_0 afin de ne pas saturer le réseau sans avoir fait d'observation de sa capacité. Au fur et à mesure, l'automate atteint son niveau d'émission maximum E_3, si les conditions de trafic du réseau le permettent. A chaque instant, en fonction de la capacité du réseau, l'automate change d'état. Si, à un moment, la mesure avec NIMBE

est impossible (par exemple beaucoup de pertes de paquets), l'automate retourne dans l'état E_0 afin de pas perturber un peu plus le réseau. L'automate est représenté sur la Figure 4.13.

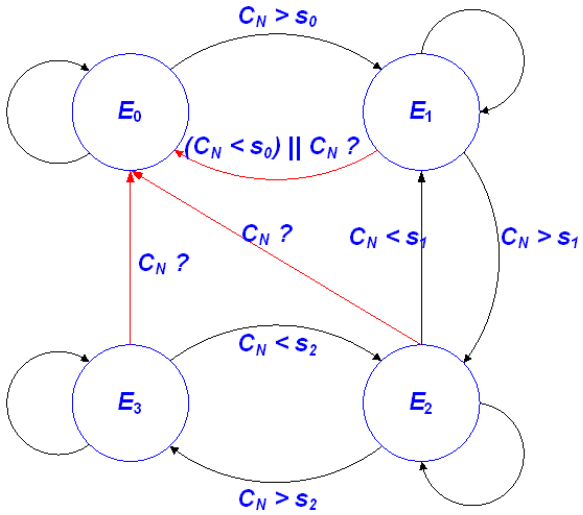

Figure 4.13 – Les différents états de l'automate de gestion des émissions

Par exemple, si $s_0 = 25$ %, $s_1 = 50$ % et $s_2 = 75$ %. Si $\overline{BW_k}$ et p_{loss} sont inférieurs à 25 %, l'état E_3 est choisi par l'automate. Si $\overline{BW_k}$ décroit à 60 % de la valeur totale de bande passante, la capacité C_i est inférieure à s_2 et l'automate passe dans l'état E_2.

L'utilisation combinée d'un estimateur de bande passante NIMBE et d'un automate d'émission permet d'avoir un comportement "citoyen" de chaque noeud du réseau : en effet, les noeuds n'ajoutent pas de trafic dans le cas d'une saturation du réseau afin d'éviter son effondrement et de minimiser la consommation énergétique des noeuds. L'émission est très gourmande en termes de consommation et il est inutile que le noeud émette un message qui serait perdu par manque de bande passante : grâce à NIMBE, l'émission est conditionnée par la disponibilité de bande passante. Ce comportement permet d'assurer la QoS du réseau en favorisant notamment les messages prioritaires et en évitant l'écroulement du réseau. De plus, l'estimateur utilisé est non invasif, car il utilise les messages de contrôle du protocole de routage.

Ce chapitre a montré que la QoS dans le protocole CIVIC repose sur plusieurs principes :

- l'utilisation de plusieurs supports de communication,
- la prise en compte du contexte du réseau,

– l'estimation de la bande passante,
– l'utilisation d'antennes directives.

Les approches développées permettent d'améliorer la bande passante à différentes échelles. L'estimateur NIMBE développé permet de manière non invasive de déterminer la capacité du réseau et d'adapter le comportement des noeuds afin de ne pas avoir un écroulement des performances du réseau.

Il convient maintenant de validé tous les concepts précédemment présentés au travers de de prototypes. Des antennes directives pour améliorer la connectivité des réseaux agri-environnementaux et, par conséquent, la QoS sont réalisées. Les premiers prototypes de modules e-CIVIC doivent être construits et intégrés dans les applications auxquelles ils sont destinés.

⋆⋆⋆⋆⋆⋆⋆

Chapitre 5

Antennes directives et modules embedded-CIVIC : premières réalisations

"Je ne vous en croirai qu'après l'expérience."
Corneille, *Le Cid (Acte II, Scène 1)*

Sommaire

5.1 Des antennes directives pour améliorer la connectivité des noeuds 100
5.1.1 Le principe des antennes directives asservies 100
5.1.2 L'asservissement des antennes 106
5.1.3 La validation des antennes directives asservies 110
5.2 La validation du concept de réseau agri-environnemental et d'architecture multicomposants 113
5.2.1 Des réseaux sans fil pour une agriculture raisonnée 113
5.2.2 Un réseau sans fil pour l'aide aux personnes et la protection de l'environnement 115
5.2.3 Des modules e-CIVIC pour mesurer l'humidité des sols 118

La connectivités des noeuds au sein des réseaux agri-environnementaux est une question importante. La densité de noeuds peut être faible et il faut maintenir les liens entre les noeuds même si les distances entre eux sont importantes. L'utilisation d'antennes directives asservies apporte une réponse à cette question et contribue, en maintenant cette connectivité, à améliorer la QoS dans les réseaux.

Les différents concepts ayant été présentés, la réalisation des premiers réseaux agri-environnementaux avec les premiers prototypes de module e-CIVIC est maintenant possible.

5.1 Des antennes directives pour améliorer la connectivité des noeuds

Les antennes directives permettent d'améliorer la connectivité dans les réseaux et donc la QoS en augmentant la portée des signaux radio des modules de communication (voir 4.2.2 page 84). La mise en oeuvre retenue pour les réseaux agri-environnementaux est d'utiliser un asservissement mécanique des antennes.

Cette section expose donc la méthodologie retenue ainsi que les résultats obtenus. Mais, dans un premier temps, une présentation des antennes directives est réalisée.

5.1.1 Le principe des antennes directives asservies

Les antennes directives

Il existe deux principales familles d'antennes : les antennes *omnidirectionnelles* ou isotropiques et les antennes *directives*. Les premières rayonnent de manière équivalente dans tout l'espace les entourant et, ce, sur 360°. Les secondes, en revanche, ne rayonnent que dans une ou quelques régions privilégiées de l'espace : par exemple sur 180° pour les antennes de type patch ou bien suivant un lobe très étroit comme celles de type Yagi.

Dans le cadre de ces travaux, les antennes directives utilisées sont de la marque SMC (voir la Figure 5.1) et sont adaptées aux signaux de 2,4 GHz afin d'être exploitables avec des cartes de type IEEE 802.11b. Elles possèdent les caractéristiques de rayonnement présentées par la Table 5.1.

Le gain maximum de l'antenne est de 10,5 dBi. La puissance reçue par un récepteur P_r est donnée par la formule 5.1 :

$$P_r = \frac{P_e G}{4\pi d^2} \tag{5.1}$$

où P_e est la puissance émise par la source, G le gain de l'antenne et d la distance entre la source et le récepteur.

Figure 5.1 – L'antenne directionnelle SMC DI105

Angle	**Distance**
Point à Point	8 km
20°	7,24 km
45°	6,43 km
90°	5,63 km
180°	4,8 km
270°	3,2 km
360°	2,4 km

Table 5.1 – La portée de l'antenne en fonction de l'écart angulaire par rapport à son axe directeur (données constructeur)

Sous l'hypothèse que la puissance reçue est la même pour chaque item de la Table 5.1, de l'équation 5.1 page ci-contre est déductible une approximation du diagramme de rayonnement de l'antenne par le calcul de son gain G_i à la distance d_i (voir l'équation 5.2) :

$$G_i = \frac{G_{max} d_i^2}{d_{max}^2} \tag{5.2}$$

Le diagramme ainsi obtenu est représenté sur la Figure 5.2.

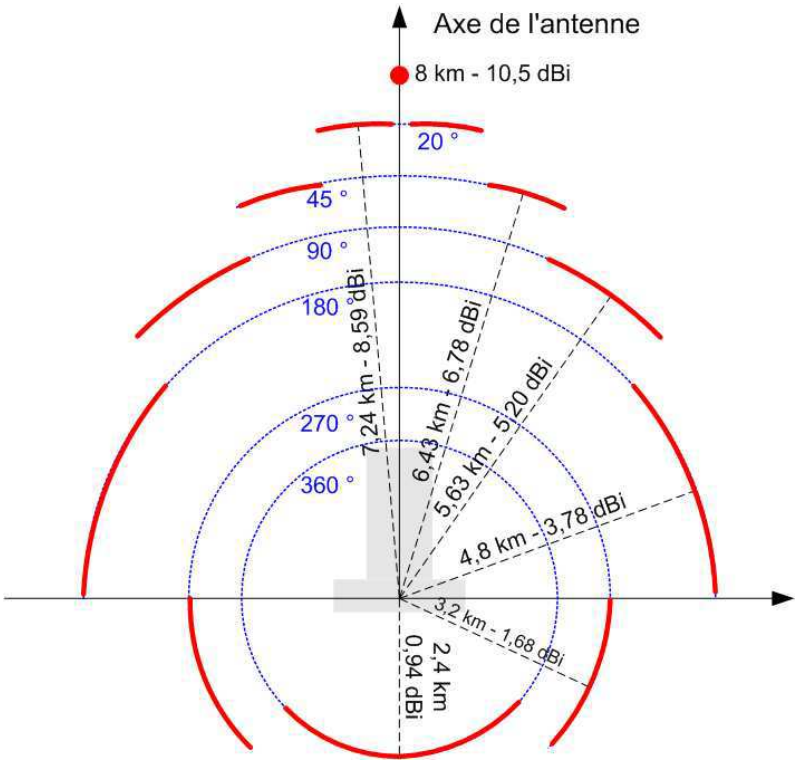

Figure 5.2 – Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive

Le comportement de cette antenne a été modélisé sous le logiciel OPNET. Ce logiciel possède un module permettant de saisir les diagrammes de rayonnement d'antennes. Le modèle de l'antenne est échantillonné suivant les valeurs des angles sphériques ϕ et θ. Pour chaque valeur de ϕ, la valeur du gain est définie et, ce, pour chaque valeur de θ. Une représentation 3D du diagramme de rayonnement est ainsi obtenue (voir la Figure 5.3).

Afin d'étudier la modélisation des antennes, un émetteur et un récepteur radio ont été simulés sous OPNET afin de mettre en évidence l'influence de l'antenne sur le signal reçu. Le scénario de simulation est représenté sur la Figure 5.4. Le récepteur (rx) est équipé d'une antenne omnidirectionnelle de 10,5 dBi de gain et l'émetteur (tx) est équipé tour à tour de la même antenne omnidirectionnelle et de l'antenne directive précédemment modélisée. L'antenne directive pointe le milieu de la trajectoire du récepteur, c'est-à-dire suivant la direction $x = 5$. Le récepteur suit la trajectoire verte avec une vitesse correspondant à une diagonale de carré de la grille toutes les 2 minutes.

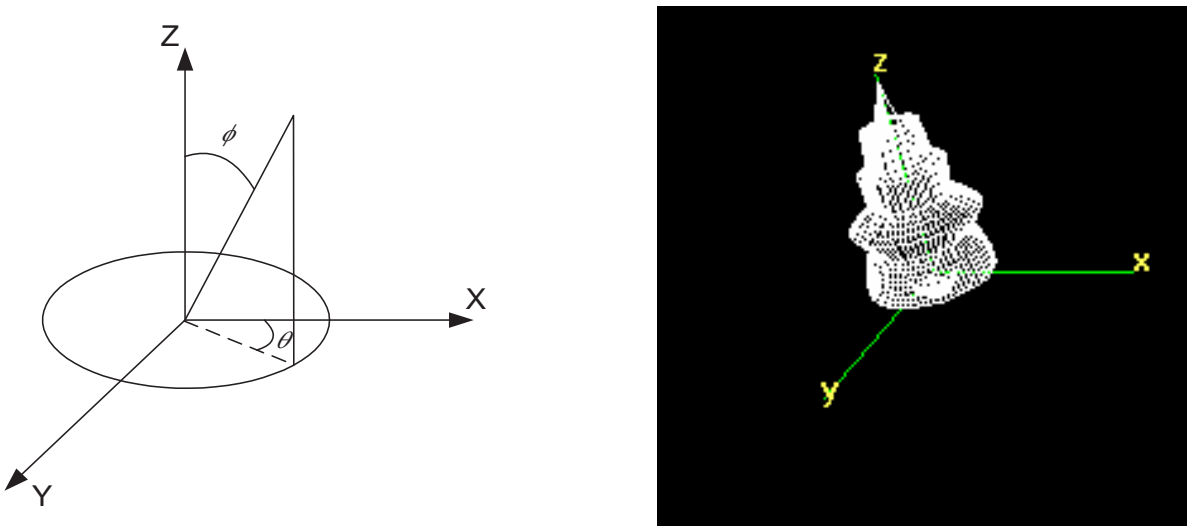

Figure 5.3 – Modélisation 3D du diagramme de rayonnement de l'antenne directionnelle

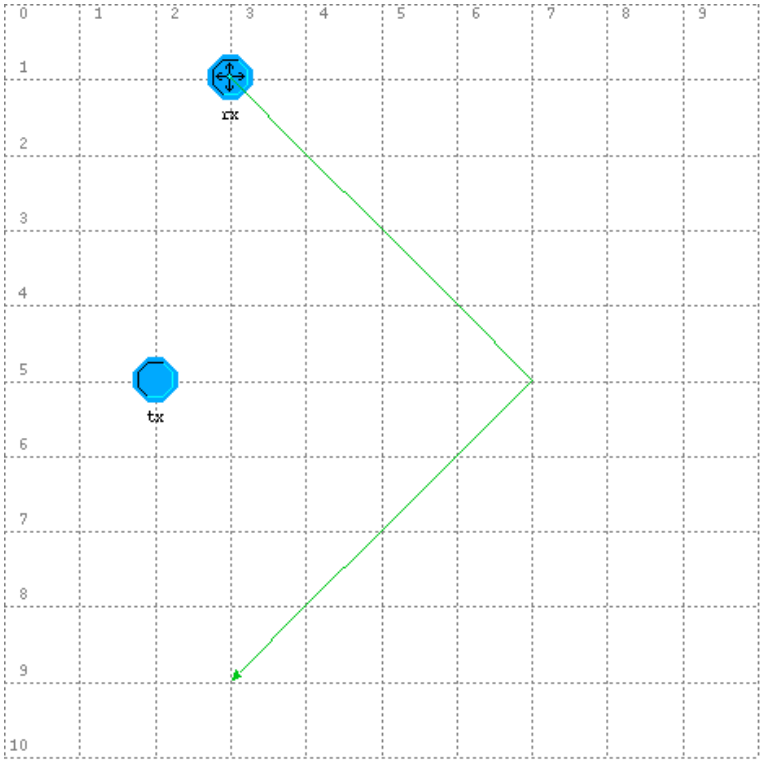

Figure 5.4 – Simulation d'un récepteur passant devant un émetteur

La Figure 5.5 montre la puissance du signal reçu par le récepteur en fonction du temps, donc de la position. Dans le cas de l'antenne omnidirectionnelle, le signal reçu (courbe pointillée bleue) est influencé uniquement par la distance récepteur - émetteur (le signal diminue quand la cible s'éloigne), alors que, dans le cas de l'antenne directive, la valeur du signal (courbe pleine rouge) dépend de la distance et de l'orientation de l'antenne : le signal est maximum pour la distance la plus grande, mais cette position correspond au point où pointe l'antenne. Cette simulation valide bien le fait qu'une antenne directive a une portée supérieure à une antenne omnidirectionnelle pour un gain équivalent.

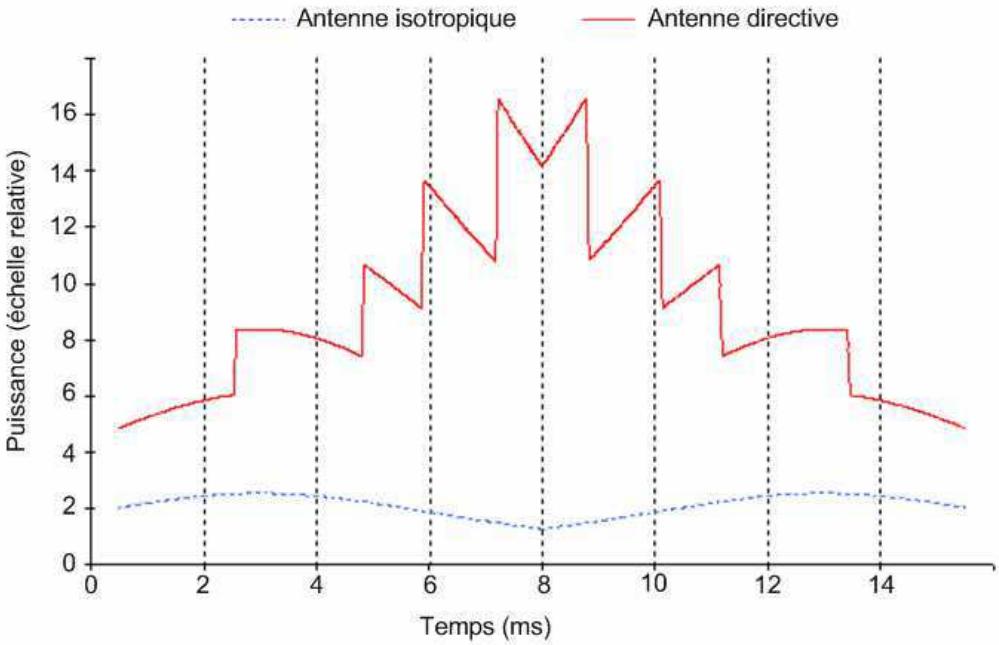

Figure 5.5 – Validation des modèles d'antenne

Des antennes asservies

Dans le cadre des réseaux agri-environnementaux, l'idée d'asservir des antennes directives permet d'avoir des portées plus importantes, donc d'augmenter la connectivité du réseau malgré la faible densité de noeuds, mais aussi d'utiliser un noeud mobile (par exemple un véhicule) pour faire de la collecte d'informations : un noeud mobile peut ainsi servir de passerelle entre le réseau de capteurs et un point distant de l'infrastructure. Ce fonctionnement permet d'avoir de faibles ressources radio au niveau des noeuds du réseau de capteurs, le véhicule servant de relais puissant pour les communications longue distance.

L'exploitation de la portée des antennes directives nécessite donc de les orienter pour que les lobes principaux coïncident : celui de l'antenne de l'infrastructure et celui de l'antenne du mobile. Si une antenne directive peut en permanence pointer un point fixe tout

en se déplaçant, elle se voit conférer le rayonnement théorique d'une antenne omnidirectionnelle (ou isotrope), c'est-à-dire avec un rayonnement identique dans tout l'espace, mais avec la puissance d'une antenne directive.

L'antenne fixée sur le mobile (véhicule) doit être asservie à la position géographique du point fixe de l'infrastructure et, ce, quelles que soient l'orientation et la direction du mobile. Quant à elle, l'antenne de l'infrastructure doit être à même de suivre les évolutions du mobile soit en connaissant sa position qui transite par le réseau, soit en balayant l'espace afin de chercher un signal en cas de perte du mobile.

L'antenne de l'infrastructure

L'antenne de l'infrastructure est asservie en rotation et en élévation. Un vérin électrique et un moteur assurent ces deux fonctions. La Figure 5.6 montre le modèle CAO de l'antenne de l'infrastructure.

Figure 5.6 – Le modèle CAO de l'antenne de l'infrastructure

Les noeuds mobiles émettent en permanence sur le réseau des paquets d'informations contenant leurs positions géographiques. Le principe de fonctionnement de cette antenne est de chercher une source de signal en faisant un balayage systématique de l'espace en utilisant ces deux mouvements. Dès qu'un signal est capté, les trames sont décodées par l'organe de contrôle de l'antenne (en l'occurrence un PC) à la recherche d'informations concernant la position de la source.

Une fois la position du mobile connue (une trame de position a été identifiée), l'antenne peut suivre le mobile au fur et à mesure de l'évolution de sa position. La vitesse de

déplacement des engins agricoles est compatible avec les temps de transfert de la positon via le réseau.

Dans le cas de plusieurs mobiles, l'antenne passe alternativement d'un mobile à l'autre en fonction des besoins en communication de chacun.

L'antenne du mobile

L'antenne du mobile doit fixer en permanence la position connue de l'infrastructure la plus proche. Pour cela, l'antenne du mobile utilise deux capteurs : un GPS et une boussole électronique. Le GPS fournit la position du mobile et son cap, la boussole fournit le cap lorsque le noeud avance à faible vitesse car, dans ce cas, la mesure de cap du GPS est erronée. De plus, dans le cas d'un engin agricole travaillant sur une parcelle, celui-ci fait des allers-retours à faible vitesse dans le champ et l'information GPS n'est pas suffisante pour déterminer son cap (notamment dans les demi-tours).

Le mobile positionne de façon continue son antenne afin de pointer l'infrastructure et émet une trame contenant sa position GPS. La Figure 5.7 montre le modèle CAO de l'antenne rotative du mobile.

Figure 5.7 – Le modèle CAO de l'antenne directive mobile

5.1.2 L'asservissement des antennes

Le calcul des angles

La Figure 5.8 présente les différents repères définis pour le calcul des angles de positionnement des antennes. Cette figure ne représente pas les angles relatifs à l'élévation des antennes.

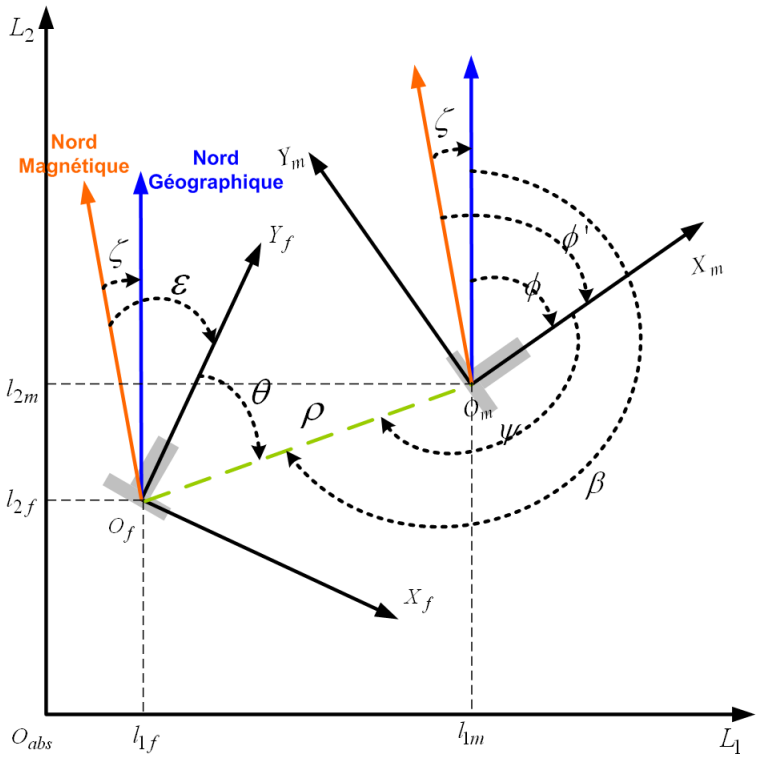

Figure 5.8 – Les différents repères définis pour le calcul des angles

Les coordonnées fournies par les GPS sont données dans le repère géographique suivant : $[O_{abs}L_1L_2]$, c'est-à-dire que le nord géographique est confondu avec l'axe L_2 parallèle au méridien de Greenwich, et l'est est confondu avec l'axe L_1 parallèle à l'Equateur [Bouteloup 00, Sillard 00].

Un repère $[O_fX_fY_f]$ lié à l'antenne fixe est défini. Ce repère correspond à la position réelle de l'antenne. Il est décalé d'un angle ϵ par rapport au nord magnétique. Cet angle est mesurable avec une boussole. Le nord magnétique est, quant à lui, décalé de la déclinaison magnétique ξ par rapport au nord géographique. Les coordonnées polaires du mobile dans le repère $[O_fX_fY_f]$ sont (ρ, θ)). Afin de simplifier les calculs, toutes les coordonnées sont ramenées au repère $[O_fX_fY_f]$ lié à l'infrastructure.

Soit (x_{fO_m}, y_{fO_m}) les coordonnées de O_m dans le repère $[O_fX_fY_f]$, la valeur de ρ est donnée par la relation 5.3 :

$$\rho = \sqrt{x_{fO_m}^2 + y_{fO_m}^2} \tag{5.3}$$

En ce qui concerne l'angle θ, le calcul s'effectue grâce aux coordonnées du mobile dans le repère $[O_fX_fY_f]$, où l'axe Y_f est orienté exactement au nord géographique. Il faut donc prendre en compte la différence entre la position réelle de l'antenne lorsque la position des moteurs est à zéro et le nord géographique : cela entraîne l'introduction des angles ϵ

et ξ dans le calcul θ (voir la Figure 5.8). L'angle ϵ est mesurable avec une boussole. La relation 5.4 donne ainsi l'expression de l'angle θ :

$$\theta = [\frac{180}{\pi} \arctan(\frac{x_{fO_m}}{y_{fO_m}})] + (\xi - \epsilon) \tag{5.4}$$

L'antenne de l'infrastructure est également asservie en élévation. Cet angle φ dépend uniquement de la hauteur relative des deux antennes. La valeur de φ est donnée par la relation 5.5 :

$$\varphi = \arcsin(\frac{Z_f - Z_m}{\rho}) \tag{5.5}$$

Un repère lié au mobile est également défini : $[O_m X_m Y_m]$. L'axe X_m est porté par le vecteur vitesse du mobile $\vec{V}$. Différents angles peuvent être définis dans cette représentation (voir la Figure 5.8) :

- ψ, l'angle entre l'axe X_m et $\vec{O_f O_m}$;
- β, l'angle entre le nord magnétique et $\vec{O_f O_m}$;
- ϕ, l'angle entre le nord géographique et l'axe X_m ; cet angle est utilisé lorsque le cap du mobile est déterminé par le GPS ;
- ϕ', l'angle entre le nord magnétique et l'axe X_m ; cet angle est utilisé quand le cap du mobile est donné par la boussole.

L'angle ψ correspond donc à l'angle entre l'axe du mobile et celui du vecteur $\vec{O_f O_m}$ (voir la Figure 5.9). Soit ψ' la position angulaire courante de l'antenne par rapport à l'axe du mobile : cette position est donnée par le codeur angulaire de l'antenne. La consigne à appliquer à l'antenne est donc l'angle ψ'' défini par l'équation 5.6 :

$$\psi'' = \psi - \psi' \tag{5.6}$$

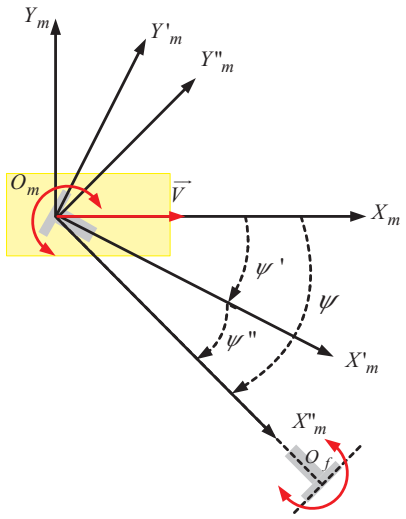

Figure 5.9 – Les consignes angulaires de l'antenne du mobile

La mise en oeuvre de l'asservissement

Les deux antennes sont reliées à un ordinateur de type PC qui assure le pilotage haut niveau des antennes. Des applications écrites en Java envoient, reçoivent et traitent les trames ; elles fournissent via un lien série les consignes d'angle aux antennes : θ, φ, ψ.

Dans le cas de l'antenne de l'infrastructure, elle reçoit via le réseau les informations de localisation du mobile $(x_{O_m}, y_{O_m}, z_{O_m})$. L'application en déduit la valeur des angles θ et φ comme vu précédemment. Si aucun message n'est capté via le réseau, l'antenne passe en mode recherche et scrute l'espace en faisant varier ces deux angles à la recherche d'un signal de position de mobile.

Pour l'antenne du mobile, l'application utilise un GPS qui lui permet d'avoir sa position et son cap quand la vitesse est suffisante. Quand la vitesse est faible, inférieure à 5 km/h, le cap est fourni par la boussole électronique. L'application envoie la position du mobile sur le réseau et calcule l'angle ψ. La Figure 5.10 montre le principe de l'asservissement de l'antenne avec la prise en compte de la position courante de l'antenne.

Les asservissements au niveau des microcontrôleurs sont des PID logiciels pour les deux antennes.

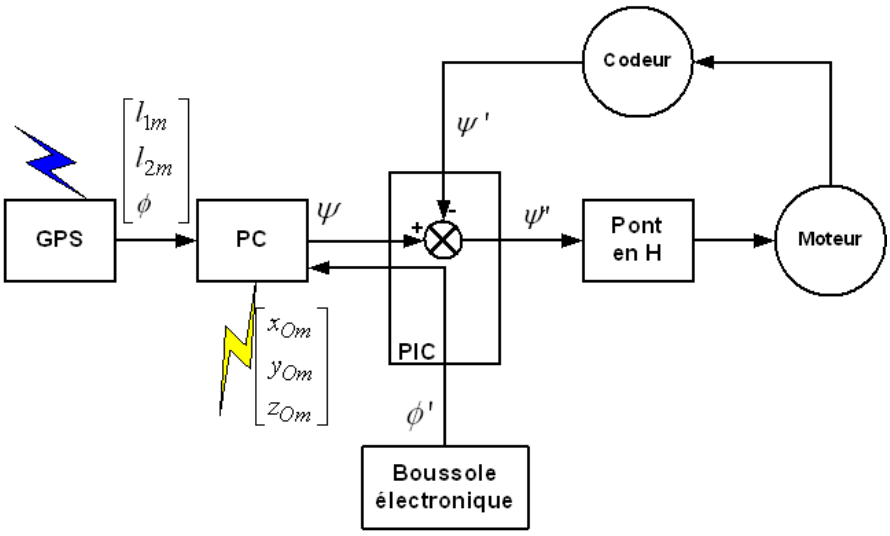

Figure 5.10 – Le schéma de l'asservissement de l'antenne mobile

5.1.3 La validation des antennes directives asservies

La réalisation des antennes

La Figure 5.11 présente les deux antennes réalisées. L'antenne de l'infrastructure est animée par un moteur pour l'angle θ et un vérin électrique pour l'angle ϕ. L'antenne du mobile, quant à elle, possède un moteur pour assurer la rotation suivant l'angle ψ et, grâce à un collecteur tournant, la rotation est infinie.

Figure 5.11 – La réalisation des deux antennes asservies

Les résultats obtenus

Les antennes ont été intégrées sur le site expérimental du Cemagref à Montoldre (Allier). Elles sont toutes les deux reliées à un ordinateur de type PC équipé d'une carte IEEE 802.11b. La Figure 5.12 montre un engin équipé de son antenne.

Figure 5.12 – L'antenne directive mobile

Les premiers essais en statique ont permis de valider la communication entre les deux ordinateurs sans perte de performances en termes de débit par rapport à des antennes traditionnelles.

Les essais suivants ont permis de valider la précision des commandes et le respect des consignes. On constate que la précision de positionnement des antennes est de l'ordre de 2°. Ceci est compatible avec les diagrammes de rayonnement des antennes utilisées pour avoir une portée de quelques kilomètres.

Les expérimentations dynamiques ont permis de suivre un mobile à 2 km avec une application faisant du streaming audio sans perte de données. La bande passante des cartes 802.11b est réglée sur 1 Mb/s. Ces performances permettent d'utiliser un engin mobile comme passerelle entre un RCSF installé sur une parcelle et un point de collecte de données distant.

L'antenne mobile a également été montée sur une voiture afin d'être exploitée dans un contexte de convoi de véhicules. Elle a été réglée en mode "oscillation", c'est-à-dire qu'elle est tournée vers l'avant du véhicule puis vers l'arrière et, ce, à une fréquence de 2 Hz.

L'expérimentation consiste à faire suivre trois véhicules, celui du milieu étant équipé de l'antenne asservie et d'un ordinateur de type PC. Les deux autres sont équipés d'une

antenne directive (non asservie) et envoient des paquets vers la voiture du milieu grâce à un module CIVIC. La Figure 5.13 montre les deux types d'antennes (cercle blanc).

Le convoi évolue à une vitesse de 50 km/h. Le taux de perte a été mesuré et il varie de 3 à 50 %. Ces performances sont équivalentes à des véhicules équipés d'une antenne omnidirectionnelle, mais les portées sont plus importantes et la diffusion des messages est contenue dans une direction donnée et ainsi ne pollue pas tout l'espace.

Figure 5.13 – Expérimentation avec des véhicules en convoi

5.2 La validation du concept de réseau agri-environnemental et d'architecture multicomposants

Bien souvent, l'utilisation de capteurs sans fil pour l'agriculture et l'environnement est limitée à une tâche particulière [Wang 06] comme la surveillance d'une parcelle, les relevés météorologiques, l'irrigation, le guidage de véhicules. Il n'y a pas d'approche globale pour fédérer toutes ces applications qui sont bien souvent restreintes à un cadre expérimental. De plus, les réseaux ad hoc sont très peu, voire pas diffusés dans le monde réel et ne sont encore utilisés que pour des expérimentations ponctuelles [Kiess 07].

Le choix a été fait de construire différents projets permettant de valider le concept de réseaux agri-environnementaux, c'est-à-dire la collaboration de plusieurs types de capteurs ou de mobiles réalisant différents services en liaison avec l'agriculture et l'environnement.

5.2.1 Des réseaux sans fil pour une agriculture raisonnée

Dans le cadre du projet européen nommé TWISTER[26] (Terrestrial Wireless Infrastructure integrated with Satellite Telecommunications for E-Rural), le Cemagref a mené une expérimentation afin de recenser les besoins du secteur agricole vis-à-vis des technologies sans fil[27]. Il est apparu que les technologies sans fil, en l'occurrence le Wi-Fi, avaient un champ d'application limité si elles étaient utilisées de manière traditionnelle, c'est-à-dire avec un point d'accès et des clients à portée radio de ce point d'accès.

En revanche, si la portée du réseau était augmentée via un réseau ad hoc, les applications possibles devenaient plus nombreuses et pertinentes dans le contexte d'une agriculture raisonnée [Boffety 06, Chanet 06a, Chanet 05] : suivi des engins agricoles, management de l'irrigation, surveillance des animaux. Les modules e-CIVIC n'étant pas encore développés au moment du projet, le réseau ad hoc utilisé est basé sur le protocole OLSR. Par exemple, la Figure 5.14 montre un pivot d'irrigation pilotable à distance via le réseau ad hoc. Le pivot sert également de relais pour l'information au sein de l'exploitation [Chanet 06a].

[26] Projet intégré européen du FP6 coordonné par EADS Astrium, 2004-2007, `http://www.twister-project.net/`

[27] `http://twister.teledetection.fr/`

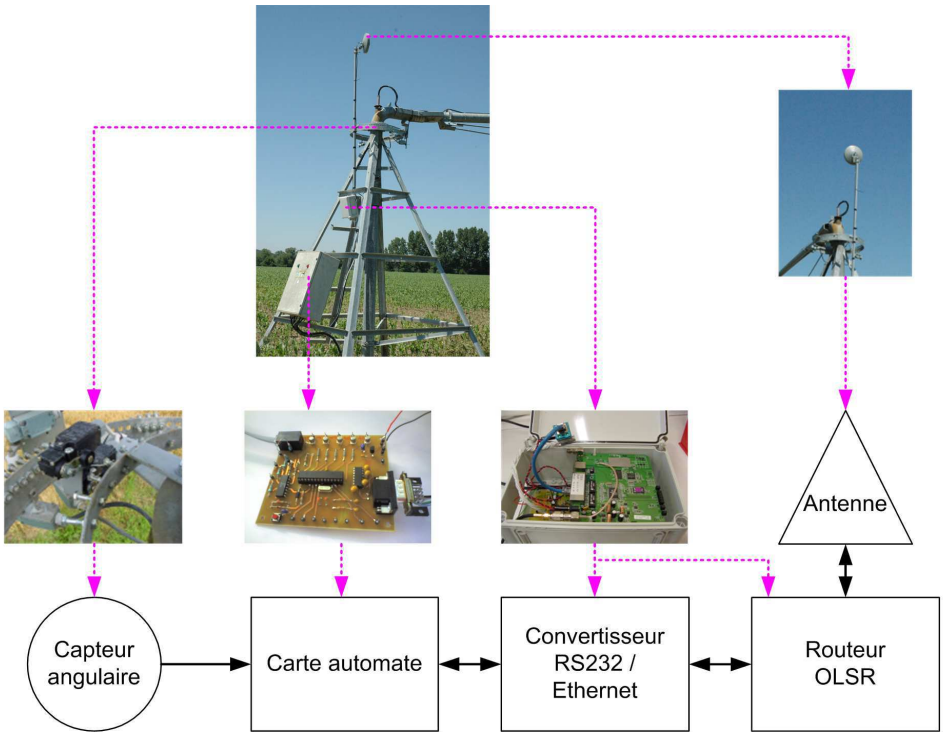

Figure 5.14 – Un pivot d'irrigation automatisé comme noeud d'un réseau ad hoc

Le suivi et la visualisation des positions des pivots d'irrigation sur les parcelles sont possibles à distance via un PC Wi-Fi ou un PDA Wi-Fi. L'application de supervision spécifique a été développée et mise en place sur le PC de bureau de la ferme. Cette application web consultable à distance a été développée en langage PHP avec l'aide du serveur cartographique gratuit MapServer. Grâce à la récupération d'une trame, l'image des 4 pivots affichée par Mapserver est modifiée tous les 10° d'angle parcouru par les pivots. Dans un second temps, un module de commande à distance via le réseau a été développé : depuis un PC relié à l'Internet, en se connectant au serveur de l'exploitation, il est possible d'envoyer des ordres aux pivots.

Dans le contexte de ce premier réseau agri-environnemental, les antennes directives asservies ont également été validées dans le cadre de l'acquisition de données sur des équipements mobiles [Chanet 05]. Couplées à un dispositif embarqué, le Cematrace[28] [André 03], elles permettent de transférer les données relatives au fonctionnement des équipements vers l'exploitation agricole soit directement, soit via un relais intermédiaire comme par exemple une tour de pivot. La Figure 5.14 présente une tour de pivot avec les différents éléments constituants le noeud OLSR (routeur, antenne) ainsi que les capteurs.

Des relais autonomes ont également été développés afin de pouvoir assurer le rôle de MMRS (voir la Figure 5.15 page ci-contre). Ces relais sont alimentés par une batterie et

[28] `http://www.satplan.fr/sattrace.asp`

un panneau solaire et embarquent un noeud (dans le cadre de cette validation, un noeud OLSR) qui assure le relayage de l'information ou l'accès à Internet via le réseau filaire. Une antenne omnidirectionnelle de 16 dBi sur le sommet d'un mât (6 m) permet d'avoir une portée mesurée de 1 km.

Figure 5.15 – Un exemple de relais autonome pouvant servir de MMRS

Les résultats de ce projet montrent qu'un réseau sans fil pour l'agriculture doit être un réseau hybride (infrastructure et ad hoc) afin d'avoir une couverture suffisante. Dans ce cas, différents applications sont envisageables et en phase avec les besoins des acteurs : le concept de réseaux agri-environnementaux est donc tout à fait pertinent dans le contexte de l'agriculture moderne. Ce concept a d'ailleurs été intégré au projet européen NeTAD-DeD[29] (New Technologies to Avoid Digital Division in e-Divided areas) qui débutera en 2007 et qui a pour but notamment de déployer un réseau agri-environnemental dans le département de l'Allier et, ce, en prolongement du projet TWISTER.

5.2.2 Un réseau sans fil pour l'aide aux personnes et la protection de l'environnement

Un autre projet de faisabilité sur les réseaux de capteurs mobiles a été mené en collaboration avec le SMTC[30] (Syndicat Mixte des Transports en Commun de l'agglomération

[29] Projet européen STREP coordonné par EADS Astrium, 2007-2009
[30] `http://www.letram-clermontferrand.com/smtc/index.php`

clermontoise) : il de décompose en deux sous-projets intitulés MobiPlus et EnviroBus[31]. Il avait pour but d'offrir des services aux personnes à mobilité réduite utilisatrices des bus (Mobiplus) et d'avoir un outil de surveillance de l'environnement via des capteurs de gaz embarqués dans les véhicules et constituant un réseau (EnviroBus).

Le Figure 5.16 montre le schéma de principe du système développé. Les transports en commun sont souvent peu adaptés aux personnes à mobilité réduite ou handicapées. Dans le cadre de ce projet, ces personnes se voient munies d'un badge RFID (Radio Frequency IDentification) qui est lu par la borne présente sur le quai. La borne peut ainsi prévenir le bus, via un module de communication. Le bus ayant reçu l'information avant l'arrêt peut mieux accoster le quai et déclencher de manière automatique le dispositif de montée à bord, la palette [Zhou 06a]. En plus de ce service, les bus pouvant communiquer avec le quai, un capteur de gaz a été embarqué [Brunet 01, Pauly 98], couplé à un GPS, afin d'obtenir une cartographie de la pollution urbaine. Au sein de ce projet, plusieurs applications sont donc fédérées afin de tirer pleinement profit d'un réseau de capteurs environnemental.

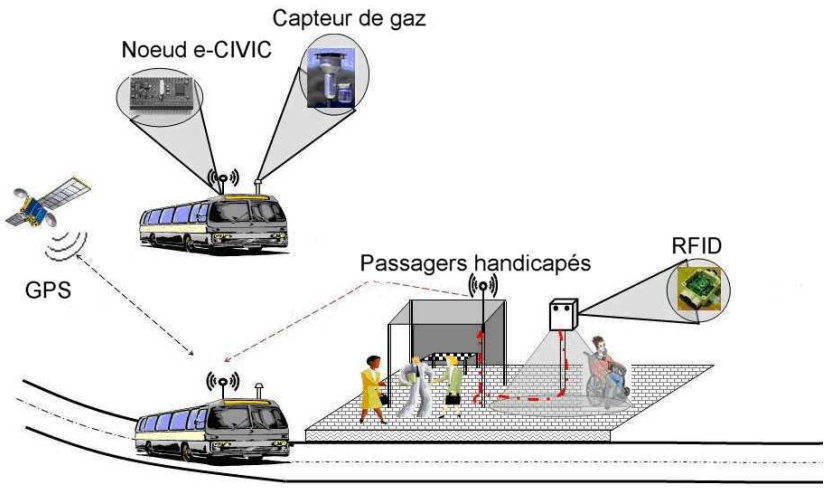

Figure 5.16 – Le schéma de principe du système MobiPlus [Zhou 06a]

Cette utilisation d'un réseau de bus pour faire des relevés de pollution est une idée originale car, actuellement, ces relevés se font à des points fixes peu nombreux. De plus, le réseau de capteurs permet d'avoir une information en temps réel de la pollution et peut, par exemple, permettre de réguler le trafic plus finement ou changer la fréquence des transports en commun.

[31]Projet financé par le SMTC avec les partenaires suivants : Limos, Cemagref, Lasmea, ESTIA, T2C, GT Aquitaine, TMS

Les modules de communication utilisés dans MobiPlus sont en fait les premiers prototypes e-CIVIC. L'algorithme de routage n'est que partiellement implémenté (il n'y a qu'une communication mobile-infrastructure), mais l'architecture multicomposants est présente. De plus, l'apport du multisupport au niveau de la QoS a également été validé.

Les modules utilisent des microcontrôleurs LPC2106 de la Société Philips. Pour le module du quai, un LPC2106 est le composant maître s'occupant de l'application, de la communication Wi-Fi et du lecteur RFID ; l'autre LPC2106 est esclave du premier et s'occupe de la liaison ZigBee (voir la Figure 5.17). Le module embarqué dans le bus est similaire, sauf le composant esclave qui gère en plus le GPS. Le lecteur RFID du composant principal est remplacé par une des entrées/sorties pour gérer les automatismes du bus (affaissement et sortie de palette) et faire l'acquisition des informations capteur.

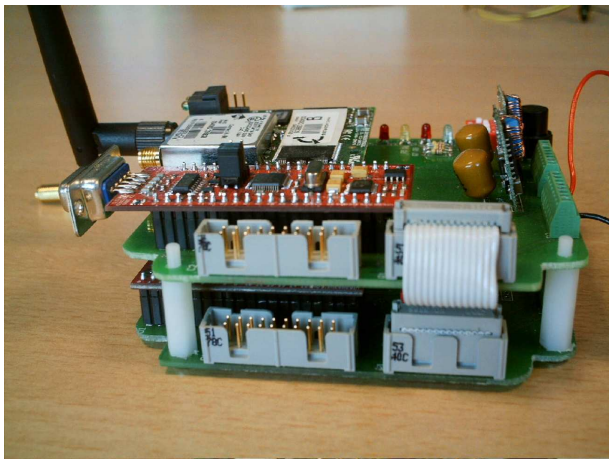

Figure 5.17 – Le module quai à deux composants du projet MobiPlus

Les microcontrôleurs des modules utilisent comme OS (Operating System) le micro noyau LIMOS [Zhou 06b]. Le protocole de routage utilisé est basé sur CIVIC : il est hybride et géographique et supporte la QoS présentée dans le Chapitre 4 page 75 pour les communications quai-bus [De Sousa 06].

Mobiplus a montré la faisabilité d'une architecture multicomposants pour réaliser des réseaux de capteurs. De plus, le concept de réseau agri-environnemental a permis d'obtenir des cartographies de pollution en fonction de la position des bus (voir la Figure 5.18) : la dispersion géographique et l'utilisation de capteurs mobiles ouvrent de nouvelles perspectives dans la surveillance de l'environnement, en permettant des maillages plus fins pour l'acquisition de données. Sur la Figure 5.18, les triangles symbolisent les points de mesure sur la ligne de bus (en vert et rouge), plus le triangle est rouge, plus le niveau de pollution est élevé.

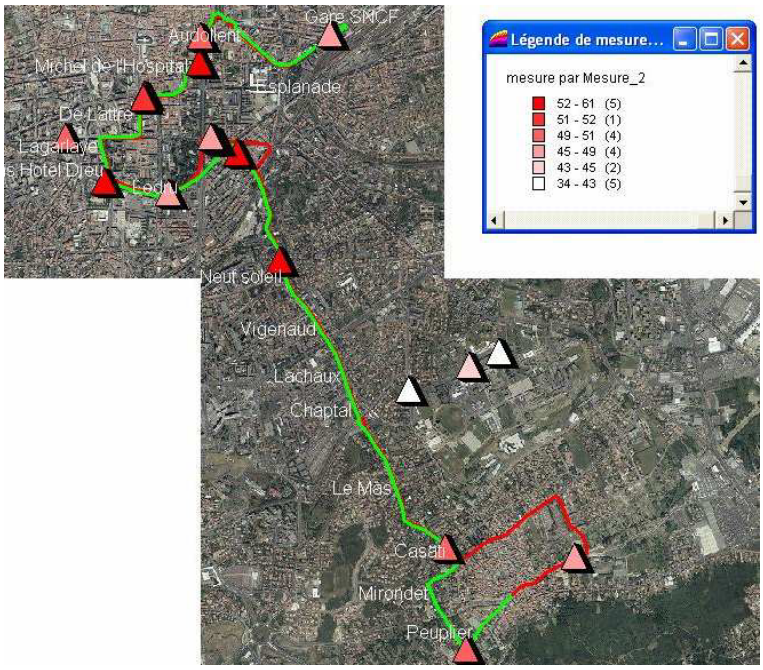

Figure 5.18 – Exemple de cartographie réalisée dans le cadre de EnviroBus

Ces premiers noeuds ont également été validés pour créer un réseau de capteurs GPS afin d'améliorer la précision de positionnement en faisant coopérer les noeuds ensemble afin de minimiser l'erreur [Kara 06]. Dans ce cas d'utilisation, le GPS sert au protocole CIVIC, mais également à améliorer le positionnement des noeuds, notamment en milieu urbain où les performances des GPS sont moindres.

5.2.3 Des modules e-CIVIC pour mesurer l'humidité des sols

La mesure de la teneur en eau des sols est une donnée pertinente pour le pilotage des irrigations dans le secteur agricole. Malheureusement, à l'heure actuelle, les sondes de mesures sont principalement filaires, ce qui limite leur déploiement pour des questions de coût. Ces sondes, appelées tensiomètres, peuvent être couplées à des modules e-CIVIC afin de les rendre autonomes et plus faciles à installer à grande échelle.

Comme cela a été présenté précédemment, le noeud est donc dimensionné en fonction de l'application à remplir. Par exemple, pour un RCSF pour le suivi de l'humidité du sol, un capteur du type de celui de la Figure 5.19 est utilisable. Ce capteur, basé sur un microcontrôleurs LPC2106 de Philips, peut même être rendu tolérant aux pannes en répartissant les différents périphériques sur trois processeurs : le premier est le composant maître et gère le médium d'accès sans fil IEEE 802.11b ; le deuxième est un esclave du premier et sert à gérer le ZigBee, le GPS et l'acquisition de données ; enfin, le troisième est aussi un esclave, mais est seulement utilisé quand un problème apparaît, la majorité du

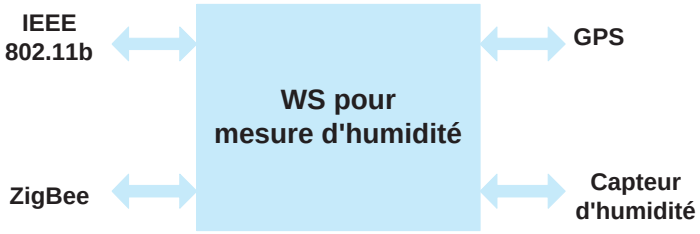

Figure 5.19 – Capteur sans fil pour la mesure d'humidité

temps il est en veille. Bien sûr, une architecture basée sur trois composants est à utiliser pour des applications ayant de fortes contraintes de sécurité (réseau de surveillance par exemple). Dans la majorité des cas, un seul processeur suffit.

Ces modules assurent le suivi dans le temps de la ressource hydrique et permettent une irrigation raisonnée des cultures, ménageant la ressource en eau et évitant la pollution des nappes phréatiques.

Les premiers prototypes de modules e-CIVIC ont été présentés et validés. Des antennes directives asservies originales ont été conçues et réalisées afin d'améliorer la connectivité au sein des réseaux agri-environnementaux.

⋆⋆⋆⋆⋆⋆⋆

Conclusion et perspectives

"En toute chose il faut considérer la fin."
Jean de La Fontaine, *Le Renard et le Bouc (III, 5)*

L'agriculture et l'environnement sont de plus en plus liés et il convient de mettre à disposition des différents acteurs intervenant dans ces milieux des outils de collecte d'informations performants. Afin de pouvoir agir au mieux, les sources d'information se doivent d'être en réseau afin de fédérer le plus rapidement possible les données collectées au sein de systèmes d'informations permettant d'aider les acteurs à prendre des décisions.

Pour cela, le concept de réseau agri-environnemental a été défini au cours de ces travaux.

> *Les réseaux agri-environnementaux sont des réseaux sans fil de type hybride (ad hoc et infrastructure) avec un support de la QoS; ils rassemblent des noeuds hétérogènes géolocalisés pouvant être mobiles et coopérants entre eux pour centraliser leurs données vers un SI.*

Le caractère hétérogène des noeuds est dû à plusieurs paramètres : les capacités de traitement des noeuds, les supports de communication dont ils disposent, leurs ressources énergétiques.

Les protocoles de routage existants ne permettant pas de répondre aux contraintes de ces réseaux, un nouveau protocole a donc été défini : le protocole CIVIC. CIVIC est un protocole de routage original car il prend en compte la position géographique des noeuds pour réaliser des émissions de message directives où les noeuds sont mis en compétition afin de réaliser le relayage de l'information de manière efficace. L'objectif du routage dans CIVIC est d'atteindre le plus rapidement possible un point d'infrastructure afin d'avoir un temps de fonctionnement en mode ad hoc le plus court possible. CIVIC est un protocole mixte, ad hoc et infrastructure, afin d'obtenir de bonnes performances.

CIVIC possède également un support de la QoS. Celle-ci est assurée à plusieurs niveaux. Le noeud peut posséder plusieurs supports de communication de différentes technologies radios. Cela permet d'augmenter les chances de délivrer un message en tenant compte des capacités de chacun des médias.

Le protocole CIVIC intègre également un estimateur de bande passante non invasif : NIMBE. Cet estimateur utilise les messages de contrôle du protocole afin de connaître à chaque mesure la bande passante disponible sur chacun des supports et de pouvoir adapter ainsi l'émission des messages en fonction de leur importance via un automate à quatre états régulant le trafic. L'estimateur NIMBE est basé sur la mesure des temps de transit des messages de contrôle, les One-way Trip Time (OTT). Il présente l'avantage de n'avoir aucune constante à définir en fonction de la topologie du réseau et de bien mesurer la bande passante disponible.

La QoS est également abordée au niveau physique dans CIVIC. En effet, le protocole de routage étant directif et utilisant la position des noeuds obtenue grâce à un GPS, des antennes asservies ont été développées. Ces antennes directives permettent d'augmenter la portée des signaux tout en limitant la pollution électromagnétique dans l'environnement du noeud en comparaison d'une antenne omnidirectionnelle. Cette augmentation de la portée des signaux radio (quelques kilomètres) permet d'utiliser les technologies radio des réseaux sans fil dans le contexte des réseaux agri-environnementaux où la densité des noeuds est faible.

Une intégration matérielle de CIVIC a également été définie : e-CIVIC. Cette architecture est basée sur le concept de multicomposants. Les modules e-CIVIC sont constitués de composants élémentaires comprenant un microcontrôleur, un médium radio, un conditionneur de signaux pour les E/S et d'un GPS. Ce composant peut être associé à d'autres afin de constituer un module e-CIVIC plus complexe présentant des capacités de tolérance aux pannes. La gestion des modules est intégrée au sein de l'OS temps réel LIMOS embarqué sur les microcontrôleurs.

Des projets nationaux et européens ont permis de valider les différents concepts de ces travaux : la notion de réseaux agri-environnementaux, la gestion de la QoS dans le protocole, l'architecture multicomposants. Ces projets ont permis de mettre au point différentes versions des modules e-CIVIC jusqu'à la version finale.

La prochaine étape de ces travaux est le déploiement à grande échelle d'un réseau agri-environnemental. Ceci sera effectué dans le cadre du projet européen NeTADDeD[32] (New Technologies to Avoid Digital Division in e-Divided areas) qui débute cette année. Des modules e-CIVIC vont être déployés au sein d'une exploitation agricole afin de suivre l'irrigation, les mouvements de véhicules, l'acquisition de données de récolte, etc. De plus, cette expérimentation en grandeur réelle permettra de recueillir des données qui pourront alimenter la simulation afin qu'elle corresponde bien avec la réalité des réseaux agri-environnementaux.

Les perspectives de recherche concernent le développement d'outils d'administration pour les module e-CIVIC. En effet, si de nombreux modules sont déployés dans la nature,

[32] Projet européen STREP coordonné par EADS Astrium, 2007-2009

leur maintenance doit être transparente. Il faut être capable de détecter les défaillances, de mettre à jour les logiciels, de reconfigurer les modules... Cela doit se faire en limitant le trafic et la consommation énergétique ; il faut donc développer un outil d'administration performant comme peut l'être SNMP (Simple Network Management Protocol) pour les réseaux filaires.

Une autre voie de développement est la création d'une boîte à outils logiciel dédiée aux réseaux agri-environnementaux. Les applications liées à ces réseaux doivent manipuler des données de diverses natures (position géographique, mesure d'humidité, mesure de niveau d'eau...) et l'existence d'une telle boîte à outils permettrait de traiter ces données au niveau des noeuds pour constituer des métadonnées, indicatrices d'un état, d'une situation. Un noeud, ou un ensemble de noeuds, pourrait ainsi fournir des données agrégées de plus haut niveau permettant de limiter le trafic sur le réseau et de constituer des dispositifs d'alerte plus performants et plus réactifs.

Une autre question de recherche importante est la sécurité au sein de ces réseaux agri-environnementaux. En effet, la multiplication des noeuds pour réaliser la collecte d'informations crée autant de points d'attaque potentiels sur le réseau. Il faudra donc étudier les formes possibles de protection applicables à ces réseaux avec des noeuds ayant des capacités de traitement restreintes pour certains.

⋆⋆⋆⋆⋆⋆⋆

Bibliographie

[Aad 01] I. Aad & C. Castelluccia. *Differentiation mechanisms for IEEE 802.11*. In INFOCOM, pages 209–218, Anchorage, USA, 2001.

[Abolhasan 04] M. Abolhasan, T. Wysocki & E. Dutkiewicz. *A review of routing protocols for mobile ad hoc networks*. Ad Hoc Network, vol. 2, pages 1–22, 2004.

[Akyildiz 02] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam & E. Cayirci. *A survey on sensor networks*. IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pages 102–114, 2002.

[Akyildiz 06] I. F. Akyildiz & E. P. Stuntebeck. *Wireless underground sensor networks*: *research challenges*. Ad Hoc Network, vol. 4, pages 669–686, 2006.

[Allman 99] M. Allman & V. Paxson. *On estimating End-to-End network path properties*. In SIGCOMM, pages 263–274, Boston, USA, 1999.

[Amamra 04] A. Amamra, R. Aufrère, J. P. Chanet, G. De Sousa, J. Li, H. Zhou & K. M. Hou. *A new adaptive zone filter to estimate RTT in MANET*. In ACIT'04, 7 pages, Constantine, Algeria, 2004.

[André 03] G. André, E. Piron, D. Boffety & F. Vigier. *Dispositif pour la transmission d'informations provenant d'au moins un capteur placé sur véhicule tel qu'une machine agricole*. Brevet n° FR0311484, Cemagref, Clermont-Ferrand, France, 13 pages, 2003.

[ANS 99] *Standard 802.11 part 11*: *wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*. Norme, ANSI, IEEE Computer Society, Piscataway, USA, 528 pages, 1999.

[Badis 03] H. Badis, A. Munaretto, K. Al Agha & G. Pujolle. *QoS for ad hoc networking based on multiple metrics*: *bandwidth and delay*. In International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, 4 pages, Sangri, Singapore, 2003.

[Bapna 98] D. Bapna, E. Rollins, A. Foessel & W. L. Whittaker. *Antenna pointing for high bandwidth communications from mobile robots*. In ICRA 1998, pages 3468–3473, Leuven, Belgium, 1998.

[Barry 01] M. G. Barry, A. T. Campbell & A. Veres. *Distributed control algorithms for service differentiation in wireless packet networks.* In INFOCOM, pages 582–590, Anchorage, USA, 2001.

[Basagni 98] S. Basagni, I. Chlamtac, V. R. Syrotiuk & B. A. Woodward. *A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM).* In MOBICOM, pages 76–84, Dallas, USA, 1998.

[Bercher 06] N. Bercher, P. Kosuth & J. Bruniquel. *Characterizing the quality of river water level time series derived from satellite radar altimetry - Efforts toward a standardized methodology.* In Symposium CNES-ESA "15 years of progress in radar altimetry", 12 pages, Venice, Italy, 2006.

[Berducat 00] M. Berducat & D. Boffety. *Gestion de l'information parcellaire - Cartographie du rendement à la récolte.* Ingénieries, vol. 24, pages 53–62, 2000.

[Berducat 05] M. Berducat, P. Clavel & J. P. Chanet. *Les applications de communication sans fil dans le machinisme agricole à l'occasion du salon international AGRITECHNICA Hanovre du 8 au 12 novembre 2005.* Note de veille, CETIM, Senlis, France, 12 pages, 2005.

[Blu 04] *Specification of the Bluetooth system: architecture and terminology overview - Covered core package version*: $2.0 + EDR$. Norme, Bluetooth SIG, 92 pages, 2004.

[Boffety 05] D. Boffety, J. P. Chanet & M. Berducat. *Les applications de communication sans fil dans le machinisme agricole pour l'échange des données, le pilotage de certaines machines et les fonctions de sécurité.* Note de veille, CETIM, Senlis, France, 11 pages, 2005.

[Boffety 06] D. Boffety, E. Barbe, J. P. Chanet, G. André, V. Abt & F. Vigier. *Implementation of mixed communication solutions, satellite and Wi-Fi, applied to agriculture - Experiments conducted in the French agricultural sector within the framework of the European project Twister.* In 4th World Congress on Computer in Agriculture, 6 pages, Orlando, USA, 2006.

[Bolot 93] J. C. Bolot. *Characterizing End-to-End packet delay and loss in the Internet.* Journal of High-Speed Networks, vol. 2, no. 3, pages 289–298, 1993.

[Bouteloup 00] D. Bouteloup. *Systèmes géodésiques - Transformations de coordonnées.* Support de cours, Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), Marne la Vallée, France, 46 pages, 2000.

[Brisset 04] P. Brisset. *Drones civils : perspectives et réalités.* Rapport technique, Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), Toulouse, France, 50 pages, 2004.

[Broch 98] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu & J. Jetcheva. *A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols.* In 4th Annual Acm/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pages 85–97, Dallas, USA, 1998.

[Brundland 87] G. H. Brundland. *Our common future.* Rapport technique, World Commission on Environment and Development of United Nation, New York, USA, 318 pages, 1987.

[Brunet 01] J. Brunet, L. Talazac, V. Battut, A. Pauly, J. P. Blanc, J. P. Germain, S. Pellie & C. Soulier. *Evaluation of atmospheric pollution by two semiconductor gas sensors.* Thin Solid Films, vol. 391, no. 2, pages 308–313, 2001.

[Bulusu 00] N. Bulusu, J. Heidemann & D. Estrin. *GPS-less low cost outdoor localization for very small devices.* IEEE Personal Communications Magazine, vol. 7, no. 5, pages 28–34, 2000.

[Campillo 05] M. Campillo, D. Le Quéau, P. Carrega, S. Cartier, P. Delecluse, P. Landais, P. Mestayer, P. Normand, A. Richard & M. Vauclin. Conjoncture 2004, volume 2, Chapitre 5 - Environnement, risques, sécurité, pages 117–132. CNRS, 2005.

[Cardell-Oliver 04] R. Cardell-Oliver, K. Smettem, M. Kranz & K. Mayer. *Field testing a wireless sensor network for reactive environmental monitoring.* In International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 6 pages, Melbourne, Australia, 2004.

[Chanet 03] J. P. Chanet, D. Boffety, J. Li, F. Pinet, P. Gerbe, M. Schneider, F. Vigier & K. M. Hou. *Ad hoc network for agriculture.* In 4th EFITA, volume 2, 2 pages, Debrecen-Budapest, Hungary, 2003.

[Chanet 04a] J. P. Chanet, D. Boffety, J. F. Devaux, K. M. Hou & S. Bouazdi. *Communication et équipements agricoles - Du réseau embarqué au réseau ad hoc sans fil pour l'intégration des équipements agricoles dans des systèmes d'information étendus.* Ingénierie, vol. Numéro Spécial Technologies pour les Agrosystèmes Durables, pages 177–190, 2004.

[Chanet 04b] J. P. Chanet, H. Jaudoin, M. Duboisset & F. Pinet. *Information systems technologies for sustainable management - A global approach.* In AgEng, 8 pages, Leuven, Belgium, 2004.

[Chanet 05] J. P. Chanet, D. Boffety, G. André, T. Humbert, P. Rameau, A. Amamra, G. De Sousa, E. Piron, K. M. Hou & F. Vigier. *Wireless technologies for field data acquisition.* In 5th EFITA, pages 681–686, Vila Real, Portugal, 2005.

[Chanet 06a] J. P. Chanet, D. Boffety, G. André & F. Vigier. *Ad hoc network for agriculture: irrigation management.* In XVI CIGR World Congress, 6 pages, Bonn, Germany, 2006.

[Chanet 06b] J. P. Chanet, K. M. Hou, A. Amamra, G. De Sousa & J. J. Li. *A Non Invasive Manet Bandwidth Estimator for quality of service: NIMBE.* In 5th IEEE International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS'2006), 4 pages, Cuiaba, Brazil, 2006.

[Chanet 06c] J. P. Chanet, H. Zhou & J. J. Li. *Communication Inter Véhicule Intelligente et Coopérative : CIVIC.* In Accès et Accessibilité à la Ville, Université Européenne d'Eté 2006, 17 pages, Clermont-Ferrand, France, 2006.

[Charvat 01] K. Charvat, J. Fryml, S. Holy, P. Gnip, Z. Travnicek, Z. Krivanek & A. Sida. *Wireless tools for agriculture and forestry.* In 1st Mobile Communications Summit, 6 pages, Barcelona, Spain, 2001.

[Chaudet 04] C. Chaudet. *Autour de la réservation de bande passante dans les réseaux ad hoc.* Thèse de doctorat en informatique, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Lyon, France, 145 pages, 2004.

[Chen 98] T. Chen & M. Gerla. *Global State Routing: a new routing scheme for ad hoc wireless networks.* In IEEE International Conference on Communications (ICC), pages 171–175, Atlanta, USA, 1998.

[Chen 99] T. Chen, M. Gerla, M. Kazantzidis, Y. Romanenko & I. Slain. *Experiments on QoS adaptation for improving end user speech perception over multi-hop wireless networks.* In QoS Mini Conference in conjunction with IEEE ICC'99, 8 pages, Vancouver, Canada, 1999.

[Chen 05] L. J. Chen, T. Sun, G. Yang, M. Y. Sanadidi & M. Gerla. *Adhoc probe - Path capacity probing in wireless ad hoc networks.* In 1st IEEE International Conference on Wireless Internet (WICON 2005), 8 pages, Budapest, Hungary, 2005.

[Chlamtac 03] I. Chlamtac, M. Conti & J. J. N. Liu. *Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges.* Ad Hoc Networks, vol. 1, pages 13–64, 2003.

[Choudhury 05] R. R. Choudhury & N. H. Vaidya. *Performance of ad hoc routing using directional antennas.* Ad Hoc Networks, vol. 3, no. 2, pages 157–173, 2005.

[Clausen 03] T. Clausen & P. Jacquet. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR).* RFC 3626, IETF - Network Working Group, 75 pages, 2003.

[Corson 99] S. Corson & J. Macker. *Mobile Ad hoc Networking (MANET): routing protocol performance issues and evaluation considerations.* RFC 2501, IETF - Network Working Group, 13 pages, 1999.

[Cunha 05] J. B. Cunha. *New horizons in sensor technology for precision agriculture.* In AFITA/WCCA Joint Congress on Information Technologies in Agriculture, 6 pages, Bangkok, Thailand, 2005.

[Cuny 98] A. S. Cuny. Traçabilité : guide pratique pour l'agriculture et l'industrie alimentaire. Acta Publications, Paris, 1998.

[Dai 06] F. Dai & J. Wu. *Efficient broadcasting in ad hoc wireless networks using directional antennas.* IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 17, no. 4, pages 321–334, 2006.

[Das 98] S. R. Das, R. Castaneda, J. Yan & R. Sengupta. *Comparative performance evaluation of routing protocols for mobile ad hoc networks.* In 7th International Conference on Computer Communications and Networks, pages 153–161, Lafayette, USA, 1998.

[De Sousa 05] G. De Sousa, J. P. Chanet, A. Amamra, J. Hao, M. A. Kang, F. Pinet & K. M. Hou. *Protocole de communication sans fil dédié : Obstacle Location-Aided Routing.* In 9ème Journée Scientifique de l'Ecole Doctorale Science Pour l'Ingénieur : Véhicules Intelligents, pages 9–20, Clermont-Ferrand, France, 2005.

[De Sousa 06] G. De Sousa, H. Zhou, K. M. Hou, J. P. Chanet & C. De Vaulx. *LEC: an operating system routing protocol integrated for wireless sensor.* In 5th IEEE International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS'2006), 2 pages, Cuiaba, Brazil, 2006.

[Dhoutaut 03] D. Dhoutaut. *Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc : de la simulation à l'expérimentation.* Thèse de doctorat en informatique, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Lyon, France, 153 pages, 2003.

[Doshi 02] S. Doshi, S. Bhandare & T. X. Brown. *A on-demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network.* Mobile Computing and Communication Review, vol. 1, no. 2, pages 3–14, 2002.

[Dunkels 04] A. Dunkels, B. Gronvall & T. Voigt. *Contiki - A lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors.* Local Computer Networks, 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04), pages 455–462, 2004.

[Efken 98] J. Efken. *Computer-based networks; perspectives for agriculture - Considerations about the possible future role of Internet or similar computer-based networks for farmers.* Landbauforschung Volkenrode, vol. 48, no. 3, pages 159–167, 1998.

[Egn 05] Egnite Software GmbH. *Ethernut Software Manual*, 2005.

[Ergen 02] M. Ergen, S. Coleri, B. Dundar, R. Jain, A. Puri & P. Varaiya. *Application of GPS to mobile IP routing in wireless network.* In IEEE

56th Vehicular Technology Conference, pages 1115–1119, Vancouver, Canada, 2002.

[Ermel 02] E Ermel, A. Fladenmuller & G. Pujolle. *Geographical routing for heterogeneous wireless systems.* In IFIP Med-Hoc-Net, 5 pages, Sardaigna, Italia, 2002.

[EST 99] *Broadband Radio Access Networks (BRAN)*; *HIgh PErformance Radio Local Area Network (HIPERLAN) Type 2*; *Requirements and architectures for wireless broadband access.* Rapport technique 101 031 V2.2.1, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Sophia-Antipolis, France, 32 pages, 1999.

[Estrin 01] D. Estrin, G. Pottie, L. Girod & M. Srivastava. *Instrumenting the world with wireless sensor networks.* In Speech and Signal Processing (ICASSP 2001), pages 2033–2036, Salt Lake City, USA, 2001.

[Falconnet 01] F. Falconnet & F. Guillon. *Avis sur la traçabilité des denrées alimentaires.* Rapport technique, Conseil National de l'Alimentation (CNA), Paris, France, 43 pages, 2001.

[Feriot 00] J. B. Feriot, T. Staudacher & L. P. Ricard. *Les instruments de surveillance au Piton de la Fournaise.* Rapport technique, Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise, Institut de Physique du Globe, Paris, France, 22 pages, 2000.

[Garelli 05] R. Garelli, N. Royères & C. Tschopp. 802.11 vs Hyperlan. Mémoire de master en informatique, Université Montpellier II, Montpellier, France, 60 pages, 2005.

[Gauthier 05] V. Gauthier, R. De Rasse, M. Marot & M. Becker. *On a comparison of four ad hoc routing protocols when taking into account the radio interferences.* In 3rd International Working Conference on Performance Modelling And Evaluation Of Heterogeneous Networks, 10 pages, Ilkley, United Kingdom, 2005.

[Giordano 02] S. Giordano. Handbook of wireless networks and mobile computing, Chapitre Mobile ad hoc networks, pages 325–346. John Wiley & Sons, Inc, 2002.

[Grieco 03] L. A. Grieco & S. Mascolo. *End-to-End bandwidth estimation for congestion control in packet networks.* Lecture Notes In Computer Science, vol. 2601, pages 645–658, 2003.

[Haas 02a] Z. J. Haas, M. R. Pearlman & P. Samar. *The Bordercast Resolution Protocol (BRP) for ad hoc networks.* Internet draft 2, Cornell University, New York, USA, 15 pages, 2002.

[Haas 02b] Z. J. Haas, M. R. Pearlman & P. Samar. *The IntErzone Routing Protocol (IERP) for ad hoc networks.* Internet draft 2, Cornell University, New York, USA, 14 pages, 2002.

[Haas 02c] Z. J. Haas, M. R. Pearlman & P. Samar. *The IntrAzone Routing Protocol (IARP) for ad hoc networks.* Internet draft 2, Cornell University, New York, USA, 11 pages, 2002.

[Haas 02d] Z. J. Haas, M. R. Pearlman & P. Samar. *The Zone Routing Protocol (ZRP) for ad hoc networks.* Internet draft 4, Cornell University, New York, USA, 11 pages, 2002.

[Hao 05] J. Hao, K. M. Hou, J. J. Li, J. P. Chanet, C. De Vaulx, H. Zhou & G. De Sousa. *Capacity and packets delivery analysis of MANET on road.* In International Conference on Wireless Networks, ICWN05, 7 pages, Las Vegas, USA, 2005.

[Heinzelman 00] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan & H. Balakrishnan. *Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks.* In the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 10 pages, Hawaii, USA, 2000.

[Hill 02] J. L. Hill & D. E. Culler. *MICA: a wireless platform for deeply embedded networks.* IEEE Micro, vol. 22, no. 6, pages 12–24, 2002.

[Hirafuji 04] M. Hirafuji, T. Fukatsu, H. Hu, T. Kiura, M. Laurenson, D. He, A. Yamakawa, A. Imada & S. Ninomiya. *Advanced sensor-network with field monitoring servers and metbroker.* In CIGR Conference, 9 pages, Beijing, China, 2004.

[Hofmeijer 04] T. J. Hofmeijer, S. O. Dulman, P. G. Jansen & P. J. M. Havinga. *AmbientRT - Real time system software support for data centric sensor networks.* In Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference, pages 61–66, Melbourne, Australia, 2004.

[Hou 05] K. M. Hou, J. P. Chanet, F. Pinet, F. Vigier, J. J. Li, R. Aufrère, H. Zhou, G. De Sousa, A. Amamra, M. Schneider & M. A. Kang. *Vers une Communication Inter Véhicule Intelligente Coopérative : CIVIC.* In Colloque Société de l'Information, Bilan du Programme Interdisciplinaire de Recherche du CNRS 2001 - 2005, 9 pages, Lyon, France, 2005.

[Hsu 03] J. Hsu, S. Bhatia, M. Takai, R. Bagrodia & M. J. Acriche. *Performance of mobile ad hoc networking routing protocols in realistic scenarios.* In Military Communications Conference (MILCOM), pages 1268–1273, Boston, USA, 2003.

[Hu 03] N. Hu & P. Steenkiste. *Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques.* IEEE Journal On Selected Areas In Communications, vol. 21, no. 6, pages 879–894, 2003.

[Huhtonen 04] A. Huhtonen. *Comparing AODV and OLSR routing protocols.* In Seminar on Internetworking, 9 pages, Sjökulla, Iceland, 2004.

[Hurbain 03] I. Hurbain. Optimisation de la bande passante pour le broadcast video sur réseau IP : rapport bibliographique. Mémoire de master en informatique, Ecole des Mines, Paris, France, 25 pages, 2003.

[ISO 94] *Information processing systems - OSI reference model - The basic model.* Norme 7498-1, ISO/IEC, 68 pages, 1994.

[Jiang 99] M. Jiang, J. Li & Y. C. Tay. *Cluster Based Routing Protocol (CBRP).* Internet draft 1, IETF - MANET Working Group, 27 pages, 1999.

[Johansson 99] P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek & M. Degermark. *Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc networks.* In 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pages 195–206, Seattle, USA, 1999.

[Johnson 02] D. B. Johnson, D. A. Maltz, Y. C. Hu & J. Jetcheva. *The Dynamic Source Routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR).* Internet draft 10, Rice University, Houston, USA, 81 pages, 2002.

[Joshi 05] T. Joshi, H. Gossain, C. Cordeiro & D. P. Agrawal. *Route recovery mechanisms for ad hoc networks equipped with switched single beam antennas.* In Annual Simulation Symposium, 8 pages, San Diego, USA, 2005.

[Kang 01] S. S. Kang & M. W. Mutka. *Provisioning service differentiation in ad hoc networks by modification of the backoff algorithm.* In International Conference on Computer Communication and Network (ICCCN'01), 4 pages, Scottsdale, USA, 2001.

[Kara 06] M. Kara, K. M. Hou, J. P. Chanet, H. Zhou, M. A. Kang & F. Pinet. *Low Cost Differential GPS receivers (LCD-GPS): urban vehicle tracking.* In 5th IEEE International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS'2006), 6 pages, Cuiaba, Brazil, 2006.

[Karp 00] B. Karp & H. T. Kung. *GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless networks.* In ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), pages 243–254, Boston, USA, 2000.

[Kiess 07] W. Kiess & M. Mauve. *A survey on real-world implementations of mobile ad hoc networks.* Ad Hoc Networks, vol. 5, no. 3, pages 324–339, 2007.

[Kim 01] M. Kim & B. Noble. *Mobile network estimation.* In ACM SIGMOBILE, pages 298–309, Rome, Italy, 2001.

[Ko 97] Y. B. Ko & N. H. Vaidya. *Using location information to improve routing in ad hoc networks.* Rapport technique 13, Texas A&M University, Austin, USA, 11 pages, 1997.

[Ko 00] Y. B. Ko & N. H. Vaidya. *Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks.* Wireless Networks, vol. 6, pages 307–321, 2000.

[Korakis 03] T. Korakis, G. Jakllari & L. Tassiulas. *A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad hoc wireless networks.* In Mobihoc, 10 pages, Annapolis, USA, 2003.

[Krishnamurthy 05] P. Krishnamurthy & S. V. Krishnamurthy. Ad hoc network - technologies and protocols, Chapitre Use of smart antennas in ad hoc networks, pages 197–228. Springer, 2005.

[Lebars 97] J. M. Lebars & D. Boffety. *GPS - Un moyen de se localiser sur la parcelle.* Perspectives Agricoles, vol. 222, pages 26–31, 1997.

[Lee 00] S. B. Lee, G. S. Ahn, X. Zhang & A. T. Campbell. *INSIGNIA: an IP-based quality of service framework for mobile ad hoc networks.* Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 60, no. 4, pages 374–406, 2000.

[Legout 00] A. Legout. *Contrôle de congestion multipoint pour les réseaux best effort.* Thèse de doctorat en informatique, Université Nice-Sophia Antipolis, Institut Eurecom, Sophia Antipolis, France, 182 pages, 2000.

[Lenain 05] R. Lenain. *Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles en présence de glissement : application au suivi de trajectoire pour les engins agricoles.* Thèse de doctorat en robotique, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 258 pages, 2005.

[Lepoutre 89] D. Lepoutre & A. Vidal. *Télédétection et sécheresse.* Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, vol. 75, no. 8, pages 95–102, 1989.

[Levis 03] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer & D. Culler. *TinyOS: an Operating System for sensor networks.* Rapport technique, University of Berkeley, Berkeley, USA, 32 pages, 2003.

[Lin 00] Y. D. Lin, Y. C. Hsu, K. W. Oyang, T. C. Tsai & D. S. Yang. *Multihop wireless IEEE 802.11 LANs: a prototype implementation.* Journal of Communications and Networks, vol. 2, no. 4, pages 372–378, 2000.

[Lundgren 05] H. Lundgren. *Implementation and experimental evaluation of wireless ad hoc routing protocols.* Thèse de doctorat en informatique, Uppsala University, Uppsala, Sweden, 54 pages, 2005.

[Mangold 02] S. Mangold, S. Choi, P. May, O. Klein, G. Hiertz & L. Stibor. *IEEE 802.11e wireless LAN for quality of service.* In INFOCOM, 10 pages, New York, USA, 2002.

[MAP 02] MAP. *Arrêté du 30 avril 2002 du Ministère de l'agriculture et de la pèche et du ministre délégué à l'industrie, aux petites et moyennes*

entreprises, au commerce, à l'artisanat et à la consommation relatif au référentiel de l'agriculture raisonnée. Journal Officiel, vol. 104, pages 8519–8531, 2002.

[Martin 02] C. Martin & C. Pages. *Conditions et moyens d'une gestion informatisée des données pour la mise en oeuvre de l'agriculture raisonnée : exploration stratégique par la méthode d'audit patrimonial.* Ingénieries, vol. 30, pages 43–58, 2002.

[McKinion 03] J. M. McKinion, S. B. Turner, J. L. Willers, J. J. Read & J. N. Jenkins. *High speed wireless local area network for farming applications.* In ASAE Annual International Meeting, 5 pages, Las Vegas, USA, 2003.

[Meraihi 05] R. Meraihi. *Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc.* Thèse de doctorat en informatique, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST), Paris, France, 150 pages, 2005.

[Mühlethaler 02] P. Mühlethaler. 802.11 et les réseaux sans fil. Eyrolles, 2002.

[Min 02] R. Min & A. Chandrakasan. *Framework for energy-scalable communication in high-density wireless networks.* In ISLPED'02, 6 pages, Monterey, USA, 2002.

[Minet 06] P. Minet. Réseaux mobiles ad hoc et réseaux de capteurs sans fil, Chapitre Support de qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc, pages 53–83. Hermes Lavoisier, 2006.

[Moy 98] J. Moy. *OSPF version 2.* RFC 2328, IETF - Network Working Group, 244 pages, 1998.

[Munaretto 03] A. Munaretto, H. Badis, K. Al Agha & G. Pujolle. *QOLSR : Routage avec QoS dans OLSR.* In 5èmes Rencontres Francophones sur les aspects Algorithmiques des Télécommunications, 5 pages, Banyuls-sur-mer, France, 2003.

[Nandagopal 99] T. Nandagopal, T. Kim, P. Sinha & V. Bharghavan. *Service differentiation through End-to-End rate control in low bandwidth wireless packet networks.* In the 6th International Workshop on Mobile Multimedia Communications, 10 pages, San Diego, USA, 1999.

[Ni 99] S. Y. Ni, Y. C. Tseng, Y. S. Chen & J. P. Sheu. *The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network.* In 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pages 151–162, Seattle, USA, 1999.

[Noguchi 04] N. Noguchi, J. Will, J. Reid & Q. Zhang. *Development of a master-slave robot system for farm operations.* Computers and Electronics in Agriculture, vol. 44, pages 1–19, 2004.

[Ogier 00] R. Ogier, F. Templin & B. Bellur. *Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF).* In The 48th Internet Engineering Task Force, 32 pages, Pittsburgh, USA, 2000.

[Ogier 04] R. Ogier, F. Templin & M. Lewis. *Topology dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF).* RFC 3684, IETF - Network Working Group, 46 pages, 2004.

[Oost 06] I. V. Oost. *The Farm Advisory System (FAS).* In Workshop on Farm Advisory System and Farm Level Traceability, 34 pages, Ispra, Italy, 2006.

[Park 05] K. I. Park. QoS in packet network. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Kluwer, 2005.

[Pauly 98] M. Pauly & K. F. Kraiss. *Monitoring indoor environments using intelligent mobile sensors.* In 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, numéro 2198-2203, Aachen, Germany, 1998.

[Pei 00] G. Pei, M. Gerla & T. W. Chen. *Fisheye State Routing: a routing scheme for ad hoc wireless networks.* In International Conference on Communications (ICC), pages 70–74, New Orleans, USA, 2000.

[Perkins 00] C. E. Perkins. Ad hoc networking, Chapitre Ad hoc networking: an introduction, pages 1–28. Addison Wesley, 2000.

[Perkins 01a] C. E. Perkins. Ad hoc networking. Addison-Wesley, 2001.

[Perkins 01b] C. E. Perkins & P. Bhagwat. Ad hoc networking, Chapitre DSDV: routing over a multihop wireless network of mobile computers, pages 53–74. Addison-Wesley, 2001.

[Perkins 01c] C. E. Perkins & E. M. Royer. *Quality of service in Ad hoc On-demand Distance Vector routing.* Internet draft, IETF - MANET Working Group, 9 pages, 2001.

[Perkins 02] D. D. Perkins & H. D. Hughes. *A survey on quality-of-service support for mobile ad hoc networks.* Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2, no. 5, pages 503–513, 2002.

[Perkins 03] C. E. Perkins, E. M. Royer & B. Das. *Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) routing.* RFC 3561, Nokia Research Center, University of California, University of Cincinnati, 37 pages, 2003.

[Pujolle 03] G. Pujolle. *Les réseaux sans fil et l'Internet ambiant.* In DNAC 2003, 17 pages, Paris, France, 2003.

[Qayyum 00] A. Qayyum, L. Viennot & A. Lanouiti. *Multipoint relaying: an efficient technique for flooding in mobile wireless networks.* Rapport de recherche 3898, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), Rocquencourt, France, 16 pages, 2000.

[Ramanathan 05] R. Ramanathan, J. Redi, C. Santivanez, D. Wiggins & S. Polit. *Ad hoc networking with directional antennas: a complete system solution.* IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, no. 3, pages 496–506, 2005.

[Rappaport 02] T. S. Rappaport. Wireless communications: principles and practice, Chapitre Mobile radio propagation: large-scale path loss, pages 105–253. Prentice Hall PTR, 2002.

[Reddy 06] T. B. Reddy, I. Karthigeyan, B. S. Manoj & C. S. R. Murthy. *Quality of service provisioning in ad hoc wireless networks - A survey of issues and solutions.* Ad Hoc Networks, vol. 4, no. 1, pages 83–124, 2006.

[Roche 06] J. F. Roche. *The relevance of general food law and traceability for agricultural activities.* In Workshop on Farm Advisory System and Farm Level Traceability, 8 pages, Ispra, Italy, 2006.

[Royer 99] E. M. Royer & C. K. Toh. *A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks.* IEEE Personal Communications Magazine, vol. 6, no. 2, pages 46–55, 1999.

[Saha 04] A. K. Saha & D. B. Johnson. *Routing improvement using directional antennas in mobile ad hoc networks.* In IEEE Global Telecommunication Conference (GLOBECOM), 7 pages, Dallas, USA, 2004.

[Scriptor 99] S. B. Scriptor. Energy aware implementation of an ad hoc routing protocol. Mémoire de master en télécommunication, Goa University, Panaji, India, 111 pages, 1999.

[Serodio 01] C. Serodio, J. B. Cunha, R. Morais, C. Couto & J. Monteiro. *A networked platform for agricultural management systems.* Computers and Electronics in Agriculture, vol. 31, pages 75–90, 2001.

[Shah 05] S. H. Shah, K. Chen & K. Nahrstedt. *Dynamic bandwidth management for single-hop ad hoc wireless networks.* Mobile Networks and Applications, vol. 10, no. 1-2, pages 199–217, 2005.

[Sillard 00] P. Sillard. *Les projections et référentiels cartographiques.* Support de cours, Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), Marne la Vallée, Paris, 61 pages, 2000.

[Sivakumar 99] R. Sivakumar, P. Sinha & V. Bharghavan. *CEDAR: a Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing algorithm.* IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol. 17, no. 8, pages 1–12, 1999.

[Stojmenovic 02] I. Stojmenovic. *Position based routing in ad hoc networks.* IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 7, pages 128–134, 2002.

[Tabbane 97] S. Tabbane. Réseaux mobiles. Réseaux et télécommunications. Hermès, Paris, France, 1997.

[Thirion 00] F. Thirion & V. Soulignac. *Suivi des épandages de boues en agriculture utilisant un GPS et un SIG.* In 1st World Water Congress of the International Water Association, pages 258–265, Paris, France, 2000.

[Tønnesen 04] A. Tønnesen. Implementing and extending the Optimized Link State Routing Protocol. Mémoire de master en informatique, Unik University Graduate Center, Oslo, Norway, 168 pages, 2004.

[Toh 96] C. K. Toh. *A novel distributed routing protocol to support ad hoc mobile computing.* In IEEE 15th Annual International Phoenix Conference on Computers and Communications, IEEE IPCCC 1996, pages 480–486, Phoenix, USA, 1996.

[Trezentos 02] D. Trezentos. *Standard pour réseaux sans fil : IEEE 802.11.* In Traité Télécoms, volume TE 7 375, pages 1–12. Techniques de l'ingénieur, 2002.

[Tseng 03] Y. C. Tseng, S. Y. Ni & E. Y. Shih. *Adaptive approaches to relieving broadcast storms in a wireless multihop mobile ad hoc network.* IEEE Transaction on Computer, vol. 52, no. 5, pages 545–556, 2003.

[Vicisano 98] L. Vicisano, L. Rizzo & J. Crowcroft. *TCP-like congestion control for layered multicast data transfer.* In Infocom'98, pages 996–1003, San Francisco, USA, 1998.

[Vidal 96] A. Vidal, D. Troufleau, M.S. Moran & J. Qi. *Crop evapotranspiration estimation using optical and microwave remote sensing.* In Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, pages 679–684, San Antonio, USA, 1996.

[Vigier 00] F. Vigier, D. Boffety, A. Marionneau & E. Ollivier. *Automated on board system for geo-referenced grain sampling on combine harvester.* In 11th International Conference and Exhibition on Mechanization of Field Experiments, pages 133–138, Chelmsford, United Kingdom, 2000.

[Vijaykrishnan 00] N. Vijaykrishnan, M. Kandemir, M. Irwin, H. Kim & W. Ye. *Energy-driven integrated hardware-software optimizations using simple power.* In 27th Annual International Symposium on Computer Architecture, pages 95–106, Vancouver, Canada, 2000.

[Wang 06] N. Wang, N. Zhang & M. Wang. *Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective.* Computers and Electronics in Agriculture, vol. 50, no. 1, pages 1–14, 2006.

[Widmer 00] J. Widmer. Equation-based congestion control. Mémoire de master en informatique, University of Mannheim, Mannheim, Germany, 105 pages, 2000.

[Williams 02] Brad Williams & Tracy Camp. *Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks.* In 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, pages 194–205, Lausanne, Switzerland, 2002.

[Zhou 04] G. Zhou, T. He, S. Krishnamurthy & J. A. Stankovic. *Impact of radio irregularity on wireless sensor networks.* In 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications and Services, pages 125–138, Boston, USA, 2004.

[Zhou 06a] H. Zhou, G. De Sousa, J. P. Chanet, K. M. Hou, J. J. Li, C. De Vaulx & M. Kara. *An intelligent wireless bus-station system dedicated to disabled, wheelchair and blind passengers.* In International Conference on Wireless, Mobile & Multimedia Networks (ICWMN), 4 pages, Hangzhou, China, 2006.

[Zhou 06b] H. Zhou, K. M. Hou, J. P. Chanet, C. De Vaulx & G. De Sousa. *LIMOS: a tiny real-time micro-kernel for wireless objects.* In 2nd IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2006), 5 pages, Wuhan, China, 2006.

[Zhou 06c] H. Zhou, K. M. Hou & C. De Vaulx. *SDREAM: a Super-small Distributed REAl-time Microkernel dedicated to wireless sensors.* JPCC Special Issue on "Key Technologies and Applications of Wireless Sensor and Body-area Networks", vol. à paraître, 12 pages, 2006.

[Zig 05] *ZigBee specification.* Norme 053474r06, Version 1.0, ZigBee Standards Organization, San Ramon, Canada, 378 pages, 2005.

⋆⋆⋆⋆⋆⋆⋆