



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Abderrahmane Mira de Bejaia**  
Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique

ECOLE DOCTORALE RESEAUX ET SYSTEMES DISTRIBUES

## ***Mémoire de Magistère***

**En Informatique**

**Option : Réseaux et Systèmes Distribués**

### ***Thème***

---

**Proposition d'un protocole d'accès au médium dans les  
réseaux locaux sans fil IEEE 802.11 à fortes contraintes  
temporelles**

---

Présenté par

**Mohand YAZID**

Devant le jury composé de :

<b>Président</b>	MENDIL Boubekour	Professeur	Université de Bejaïa
<b>Rapporteur</b>	AÏSSANI Djamil	Professeur	Université de Bejaïa
<b>Rapporteur</b>	BOUALLOUCHE Louiza	M.C.A	Université de Bejaïa
<b>Examineur</b>	BOUKERRAM Abdellah	M.C.A	Université de Sétif
<b>Examineur</b>	ALIOUAT Makhoulf	M.C.A	Université de Sétif

**Promotion 2008-2009**

## Remerciements

*Je remercie Dieu pour m'avoir donné du courage et beaucoup de volonté pour mener bien à terme mon mémoire de Magister.*

*Mes vifs remerciements, accompagnés de toute ma gratitude vont tout d'abord à mon premier rapporteur de mémoire, Pr Djamil AÏSSANI, je le remercie particulièrement pour son accueil chaleureux au laboratoire, ses précieux conseils et orientations, et pour m'avoir fait confiance durant toute la durée de préparation de ce mémoire.*

*J'adresse mes sincères remerciements à mon deuxième rapporteur de mémoire, Dr Louiza BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE, je la remercie pour sa disponibilité, son aide, ses précieux conseils, ses critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et enfin, pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire de Magister.*

*Je tiens à remercier les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail. Dr Abdellah BOUKERRAM et Dr Makhlouf ALIOUAT en tant qu'examineurs et le Pr Boubekeur MENDIL en tant que président de jury.*

*Dans tout le reste de ma vie, et quoiqu'il arrivera dans le futur, je n'oublierai jamais MENNAD SLIMANI, pour tous les sacrifices qu'il a fait pour moi durant la première année de Magister. De toute ma vie, je n'en ai jamais rencontré une personne aussi gentille, compréhensive et généreuse comme lui. Ces quelques mots que je lui réserve dans cette page, ne pourront jamais exprimer la*

*reconnaissance que j'éprouve envers lui. Si Dieu n'a pas mis MËNNAD sur mon chemin, rien de ce que j'ai accompli aujourd'hui, n'aurait été possible.*

*Je remercie Smaine et mes collègues de travail, Hani, Rabiâa et Lyes de m'avoir apporté du soutien à la première année de Magister. Ce qu'ils ont fait pour moi est noble et inoubliable.*

*Je remercie mes amis que j'aime bien et avec qui je m'entends beaucoup, Mohamed, Karim et Amina, je les remercie tout particulièrement pour leurs oreilles attentives lorsque je sombrais dans un pessimisme effrayant.*

*Je remercie énormément mes collègues que j'apprécie beaucoup, Amirouche et Hassan, pour le temps qu'ils ont dû consacrer pour la lecture de mon mémoire et pour toutes leurs remarques pertinentes.*

*Je remercie mes collègues de ce vital, Rabha, Djad, Mouloud, Djebbar, Moundjia, Abid, Hakima, Rachid, Lamri et Naima qui n'a jamais cessé de m'encourager.*

*Je remercie mes collègues de l'école doctorale avec qui j'ai passé des moments agréables, Said, Mounir, Samir, Hichem, Khaled, Abdelkader, Abla, Nassima, Hayette, Salima, Souhila, et surtout Zahia.*

*Je ne me permettrai surtout pas d'oublier mes amis les plus intimes, Djamel et Anis, je les remercie pour leurs conseils, leurs encouragements et leurs amitiés.*

*Que tous ceux qui ont contribué à ma formation trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.*

*Et un merci tout particulier à tous ceux qui m'ont apporté leur soutien. Je pense tout particulièrement à Nassima du laboratoire LAMOS.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail*

*À mes parents,*

*À mes frères et sœurs,*

*À mes amis et collègues.*

## Liste des acronymes

<b>AES</b>	<b>A</b> dvanced <b>E</b> ncryption <b>S</b> tandard
<b>AIFS</b>	<b>A</b> rbitration <b>I</b> nter <b>F</b> rame <b>S</b> pace
<b>AP</b>	<b>A</b> ccess <b>P</b> oint
<b>APSD</b>	<b>A</b> utomatic <b>P</b> ower <b>S</b> ave <b>D</b> elivery
<b>ATM</b>	<b>A</b> synchronous <b>T</b> ransfer <b>M</b> ode
<b>BA</b>	<b>B</b> lock <b>A</b> cknowledgments
<b>BPSK</b>	<b>B</b> inary <b>P</b> hase <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>BSS</b>	<b>B</b> asic <b>S</b> ervice <b>S</b> et
<b>BSSID</b>	<b>B</b> asic <b>S</b> ervice <b>S</b> et <b>I</b> dentifier
<b>BT</b>	<b>B</b> ackoff <b>T</b> ime
<b>CAN</b>	<b>C</b> ontrol <b>A</b> ccess <b>N</b> etworked
<b>CBR</b>	<b>C</b> onstant <b>B</b> it <b>R</b> ate
<b>CCK</b>	<b>C</b> omplementary <b>C</b> ode <b>K</b> eying
<b>CDMA</b>	<b>C</b> ode <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>CFP</b>	<b>C</b> ontention <b>F</b> ree <b>P</b> eriod
<b>CNRS</b>	<b>C</b> entre <b>N</b> ational de <b>R</b> echerche <b>S</b> cientifique
<b>CP</b>	<b>C</b> ontention <b>P</b> eriod
<b>CRAN</b>	<b>C</b> entre de <b>R</b> echerche en <b>A</b> utomatique de <b>N</b> ancy
<b>CSMA/BA</b>	<b>C</b> arrier <b>S</b> ense <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess/ <b>B</b> it wise <b>A</b> rbitration
<b>CSMA/CA</b>	<b>C</b> arrier <b>S</b> ense <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess/ <b>C</b> ollision <b>A</b> voidance

<b>CSMA/CD</b>	<b>C</b> arrier <b>S</b> ense <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess/ <b>C</b> ollision <b>D</b> etection
<b>CSMA/DCR</b>	<b>C</b> arrier <b>S</b> ense <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess/ <b>D</b> eterministic <b>C</b> ollision <b>R</b> esolution
<b>CTS</b>	<b>C</b> lear <b>T</b> o <b>S</b> end
<b>CW</b>	<b>C</b> ontention <b>W</b> indow
<b>DCF</b>	<b>D</b> istributed <b>C</b> oordination <b>F</b> unction
<b>DFS</b>	<b>D</b> istributed <b>F</b> air <b>S</b> cheduling
<b>DIFS</b>	<b>D</b> istributed <b>I</b> nter <b>F</b> rame <b>S</b> pacing
<b>DLS</b>	<b>D</b> irect <b>L</b> ink <b>S</b> etup
<b>DS-EDCA</b>	<b>D</b> ifferentiated <b>S</b> ervice- <b>E</b> DCA
<b>DSSS</b>	<b>D</b> irect <b>S</b> equence <b>S</b> pread <b>S</b> pectrum
<b>DVB-S</b>	<b>D</b> igital <b>V</b> ideo <b>B</b> roadcasting - <b>S</b> atellite
<b>DVB-T</b>	<b>D</b> igital <b>V</b> ideo <b>B</b> roadcasting - <b>T</b> errestrial
<b>EDCA</b>	<b>E</b> nhanced <b>DCF</b> <b>C</b> hannel <b>A</b> ccess
<b>EDCF</b>	<b>E</b> nhanced <b>DCF</b>
<b>EDGE</b>	<b>E</b> nhanced <b>D</b> ata <b>R</b> ates for <b>G</b> SM <b>E</b> volution
<b>EDR</b>	<b>E</b> nhanced <b>D</b> ata <b>R</b> ate
<b>EF</b>	<b>E</b> xpedited <b>F</b> orwarding
<b>EPC</b>	<b>E</b> lectronic <b>P</b> roduct <b>C</b> ode
<b>ETSI</b>	<b>E</b> uropean <b>T</b> elecommunications <b>S</b> tandards <b>I</b> nstitute
<b>EY-NPMA</b>	<b>E</b> limination <b>Y</b> ield – <b>N</b> on- <b>P</b> reemptive <b>P</b> riority <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>FCS</b>	<b>F</b> rame <b>C</b> heck <b>S</b> equence
<b>FDD</b>	<b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>D</b> uplexing
<b>FDDI</b>	<b>F</b> iber <b>D</b> istributed <b>D</b> ata <b>I</b> nterface
<b>FDMA</b>	<b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>FHSS</b>	<b>F</b> requency <b>H</b> opping <b>S</b> pread <b>S</b> pectrum
<b>FIFO</b>	<b>F</b> irst <b>I</b> n <b>F</b> irst <b>O</b> ut
<b>FIP</b>	<b>F</b> actory <b>I</b> nstrumentation <b>P</b> rotocol

<b>FSK</b>	<b>F</b> requency <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>GMSK</b>	<b>G</b> aussian <b>M</b> inimum <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>GPRS</b>	<b>G</b> eneral <b>P</b> acket <b>R</b> adio <b>S</b> ervice
<b>GS</b>	<b>G</b> uaranteed <b>S</b> ervice
<b>HARQ</b>	<b>H</b> ybrid <b>A</b> utomatic <b>R</b> epeat <b>R</b> equest
<b>HCCA</b>	<b>H</b> ybrid <b>C</b> F <b>C</b> hannel <b>A</b> ccess
<b>HCF</b>	<b>H</b> ybrid <b>C</b> F
<b>HiperLAN</b>	<b>H</b> igh <b>p</b> erformance <b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork
<b>HiperLAN/1</b>	<b>H</b> igh <b>p</b> erformance <b>L</b> AN / <b>1</b>
<b>HiperLAN/2</b>	<b>H</b> igh <b>p</b> erformance <b>L</b> AN / <b>2</b>
<b>HSDPA</b>	<b>H</b> igh <b>S</b> peed <b>D</b> ownlink <b>P</b> acket <b>A</b> ccess
<b>HTR</b>	<b>H</b> orloge <b>T</b> emps <b>R</b> éel
<b>IEEE</b>	<b>I</b> nstitute of <b>E</b> lectrical and <b>E</b> lectronics <b>E</b> ngineers
<b>IFS</b>	<b>I</b> nter <b>F</b> rame <b>S</b> pacing
<b>ISO</b>	<b>I</b> nternational <b>S</b> tandardization <b>O</b> rganization
<b>JTC</b>	<b>J</b> oint <b>T</b> echnical <b>C</b> ommittee
<b>LLC</b>	<b>L</b> ogical <b>L</b> ink <b>C</b> ontrol
<b>MAC</b>	<b>M</b> edium <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol
<b>MBWA</b>	<b>M</b> obile <b>B</b> roadband <b>W</b> ireless <b>A</b> ccess
<b>MMS</b>	<b>M</b> anufacturing <b>M</b> essages <b>S</b> ervices
<b>MPS</b>	<b>M</b> anufacturing <b>P</b> eriodic <b>S</b> ervices
<b>MSDU</b>	<b>M</b> AC <b>S</b> ervice <b>D</b> ata <b>U</b> nit
<b>NAV</b>	<b>N</b> etwork <b>A</b> llocation <b>V</b> ector
<b>NoAck</b>	<b>N</b> o <b>A</b> cknowledgments
<b>OFDM</b>	<b>O</b> rthogonal <b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing
<b>OSI</b>	<b>O</b> pen <b>S</b> ervices <b>I</b> nterconnexion
<b>PCF</b>	<b>P</b> oint <b>C</b> oordination <b>F</b> unction

<b>PDU</b>	<b>Protocol Data Unit</b>
<b>PIFS</b>	<b>PCF Inter Frame Spacing</b>
<b>PSK</b>	<b>Phase Shift Keying</b>
<b>QdP/QoS</b>	<b>Qualité de Performance/Quality of Service</b>
<b>QPSK</b>	<b>Quadrature Phase Shift Keying</b>
<b>RFID</b>	<b>Radio Frequency IDentification</b>
<b>RT-MAC</b>	<b>Real Time-Medium Access Control</b>
<b>RTS</b>	<b>Request To Send</b>
<b>SCR</b>	<b>Systèmes (Contrôlés/Commandés) en Réseau</b>
<b>SDTR</b>	<b>Systèmes Distribués Temps Réel</b>
<b>SIFS</b>	<b>Short Inter Frame Spacing</b>
<b>SIG</b>	<b>Special Interest Group</b>
<b>STR</b>	<b>Systèmes Temps Réel</b>
<b>TBTT</b>	<b>Target Beacon Transition Time</b>
<b>TD-CDMA</b>	<b>Time Division-Code Division Multiple Access</b>
<b>TDD</b>	<b>Time Division Duplexing</b>
<b>TDMA</b>	<b>Time Division Multiple Access</b>
<b>TKIP</b>	<b>Temporal Key Integrity Protocol</b>
<b>TTP</b>	<b>Time Triggered Protocol</b>
<b>TTRT</b>	<b>Target Token Rotation Time</b>
<b>TXOP</b>	<b>Transmit OPportunity</b>
<b>UBR</b>	<b>Unspecified Bit Rate</b>
<b>UMTS</b>	<b>Universal Mobile Telecommunications System</b>
<b>UWB</b>	<b>Ultra Wide Band</b>
<b>VMAC</b>	<b>Virtual MAC</b>
<b>VSAT</b>	<b>Very Small Aperture Terminal</b>
<b>W-CDMA</b>	<b>Wideband-Code Division Multiple Access</b>

<b>WECA</b>	<b>Wireless Ethernet Compatibility Alliance</b>
<b>WEP</b>	<b>Wired Equivalent Privacy</b>
<b>WFQ</b>	<b>Weighted Fair Queuing</b>
<b>Wi-Fi</b>	<b>Widely-Fidelity</b>
<b>WLAN</b>	<b>Wireless Local Area Network</b>
<b>WM</b>	<b>Wireless Manager</b>
<b>WMAN</b>	<b>Wireless Metropolitan Area Network</b>
<b>WNS-RTIA</b>	<b>Wireless Network Simulator-Real Time Industrial Applications</b>
<b>WPA2</b>	<b>Wi-Fi Protected Access</b>
<b>WPAN</b>	<b>Wireless Personal Area Network</b>
<b>WWAN</b>	<b>Wireless Wide Area Network</b>

## Table des matières

<b>Liste des acronymes</b>	v
<b>Table des matières</b>	x
<b>Table des figures</b>	xiv
<b>Liste des tableaux</b>	xiv
<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I : Systèmes distribués temps réel et réseaux de communication filaires temps réel</b>	<b>5</b>
I.1. Introduction.....	5
I.2. Systèmes Temps Réel (STR) .....	6
I.2.1. Contexte et Définitions.....	6
I.2.2. Applications Temps-Réel.....	8
I.2.3. Qualité de service temporelle .....	10
I.2.4. Architecture des Systèmes Temps Réel.....	12
I.3. Systèmes Distribués Temps Réel (SDTR).....	13
I.3.1. Eléments et Structures d'un SDTR .....	14
I.3.2. Problématique des Systèmes Distribués Temps Réel .....	16
I.3.3. Qualité de Service d'un SDTR.....	18
I.3.3.1. Paramètres de Qualité de Service .....	18
I.3.3.2. Indices de Qualité de Performance .....	20
I.4. Réseaux de Communication Filaires Temps Réel .....	21

I.4.1. Architecture des réseaux de communication Temps Réel .....	21
I.4.2. Protocoles MAC Temps Réel .....	22
I.4.2.1. Classification des protocoles MAC Temps Réel .....	23
I.4.2.2. Protocoles basés sur la compétition.....	26
I.4.2.3. Protocoles à contrôle centralisé: exemple de World FIP .....	26
I.4.2.4. Protocoles à contrôle distribué .....	27
I.5. Conclusion .....	28
<b>Chapitre II : Réseaux sans fil pour les systèmes distribués temps réel</b>	<b>29</b>
II.1. Introduction .....	29
II.2. Motivations et Objectifs.....	30
II.3. Présentation des réseaux sans fil.....	34
II.3.1. Classification des réseaux sans fil.....	34
II.3.1.1. Les réseaux personnels sans fil (WPAN).....	35
II.3.1.2. Les réseaux locaux sans fil (WLAN).....	38
II.3.1.3. Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN).....	42
II.3.1.4. Les réseaux étendus (WWAN) .....	45
II.3.2. Modes de fonctionnement des réseaux sans fil .....	45
II.3.2.1. Réseaux sans fil avec infrastructure.....	46
II.3.2.2. Réseaux sans fil sans infrastructure (ad hoc).....	47
II.4. Problématique des réseaux sans fil .....	49
II.4.1. Contraintes des réseaux sans fil .....	49
II.4.2. Orientation de nos travaux.....	51
II.5. Conclusion.....	53
<b>Chapitre III : Protocoles MAC et QoS temporelle dans les réseaux WLANs</b>	<b>54</b>
III.1. Introduction .....	54
III.2. Préliminaires .....	55
III.2.1. Principes de base du Medium Access Control (MAC) .....	55

III.2.2. Notions fondamentales et principes de Qualité de Service.....	57
III.3. Protocoles MAC standards et aptitudes temps réel des réseaux WLAN .....	60
III.3.1. Protocoles MAC du Standard HiperLAN .....	60
III.3.1.1. EY-NPMA (HiperLAN/1) .....	60
III.3.1.2. TDMA Dynamique (HiperLAN/2).....	62
III.3.2. Protocoles MAC du Standard IEEE 802.11 .....	65
III.3.2.1. Principes de base de la couche MAC IEEE 802.11 .....	65
III.3.2.2. Distributed Coordination Function (DCF) .....	66
III.3.2.3. Point Coordination Function (PCF) .....	71
III.3.2.4. Limitation de la garantie temps réel dans l'IEEE 802.11 .....	75
III.4. Amélioration de la QoS de la couche MAC IEEE 802.11 .....	76
III.4.1. Amélioration de la QoS par différenciation de services .....	76
III.4.1.1. Classification des approches de différenciation de services.....	76
III.4.1.2. Approches de différenciation de service par stations .....	77
III.4.1.3. Approches de différenciation de services par flux.....	81
III.4.2. Amélioration de la QoS par garantie de service .....	83
III.4.3. Critique globale et notre approche de contribution .....	85
III.5. Conclusion .....	87
<b>Chapitre IV : Proposition, Evaluation de performances et validation d'un protocole MAC temps réel</b>	<b>89</b>
IV.1. Introduction .....	89
IV.2. Proposition d'un protocole MAC Temps réel (RT-MAC).....	90
IV.2.1. Présentation générale du protocole RT-MAC .....	90
IV.2.2. Proposition d'une approche de classification MAC du trafic temps réel .....	93
IV.2.3. Proposition d'une méthode de gestion des classes de trafic temps réel.....	98
IV.2.4. Proposition d'une technique d'accès MAC hybride adéquate aux classes de trafic Temps réel.....	102

IV.2.5. Adoption et Adaptation d'un mode de communication centralisé pour le protocole RT-MAC .....	107
IV.2.6. Organisation des canaux de communication et Orchestration des accès au médium sans fil .....	109
IV.3. Evaluation de performances et validation du protocole RT-MAC.....	111
IV.3.1. Procédé d'évaluation de performances du protocole RT-MAC.....	111
IV.3.2. Description de l'outil de Simulation WNS-RTIA.....	115
IV.3.2.1. Spécification des besoins (cahier des charges) .....	115
IV.3.2.2. Conception du Simulateur WNS-RTIA (Diagramme de classes) .....	118
IV.3.2.3. Implémentation du Simulateur WNS-RTIA .....	118
IV.3.3. Analyse des performances et Validation du protocole RT-MAC.....	120
IV.3.3.1. Imperfection de la norme IEEE 802.11 sur le plan temporel.....	120
IV.3.3.2. Analyse des aptitudes temps réel du protocole RT-MAC.....	123
IV.4. Conclusion .....	126
<b>Conclusion générale</b>	<b>127</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>131</b>

## Table des figures

Figure I.1: Un système Temps Réel : Interaction procédé-contrôleur. ....	8
Figure I.2: Installation typique d'un Système Distribué Temps Réel. ....	14
Figure I.3 : Structure Directe d'un Système Distribué Temps Réel. ....	15
Figure I.4: Structure Hiérarchique d'un Système Distribué Temps Réel.....	15
Figure I. 5 : Délais dans une boucle de régulation. ....	17
Figure I. 6 : Délais de bout en bout. ....	19
Figure I. 7 : Le modèle de référence OSI de l'ISO. ....	22
Figure I. 8 : Protocoles MAC Temps Réel selon la technique d'accès. ....	23
Figure I. 9 : Protocoles MAC temps réel selon la technique d'ordonnement. ....	24
Figure I. 10 : protocoles MAC Temps Réel de la classe 1. ....	25
Figure I. 11 : Les protocoles MAC temps-réel de la classe 2. ....	25
Figure II. 1: Classification des réseaux sans fil selon la portée.....	35
Figure II. 2 : Un scatternet Bluetooth. ....	36
Figure II. 3: Exemple de handover entre deux cellules. ....	47
Figure II. 4 : Exemple de réseau ad hoc. ....	48
Figure III. 1 : Procédé de multiplexage/Démultiplexage pour la cohabitation de plusieurs trafics sur le même médium partagé.....	55
Figure III. 2 : Déroulement d'un accès au médium réussi par la méthode EY-NPMA. .....	61
Figure III. 3 : Déroulement d'un accès au médium échoué par la méthode EY-NPMA .....	62
Figure III. 4 : La supertrame d'HiperLAN/2. ....	63
Figure III. 5 : L'alternance des modes PCF et DCF.....	66
Figure III. 6 : Règles d'accès dans DCF (méthode de base).....	68
Figure III. 7 : Règles d'accès dans DCF (méthode RTS/CTS).....	70
Figure III. 8: Déroulement temporel d'une période PCF. ....	71
Figure III. 9 : Phénomène d'écourtement de la période PCF. ....	74
Figure III. 10 : Classification des approches par différenciation de service.....	77
Figure IV. 1 : Types de tâches temps réel suivant leurs paramètres temporels. ....	94
Figure IV. 2: Types de tâches temps réel suivant la criticité des paramètres temporels. .....	94
Figure IV. 3 : Association des paramètres temporels à leurs contraintes. ....	96
Figure IV. 4 : Réduction des classes de trafic temps réel selon les paramètres temporels. ....	97
Figure IV. 5 : Concept de stations virtuelles et de station physique.....	99

Figure IV. 6 : Tamponnement et Ordonnancement local du trafic temps réel dans RT-MAC. ....	101
Figure IV. 7 : Méthode d'accès Hybride TDMA (Statique, Dynamique)/CSMA-CA. ....	106
Figure IV. 8 : Intervalles de Supertrames (Macro-Cycles). ....	110
Figure IV. 9 : Structure d'une Supertrame (Macrocycle). ....	111
Figure IV. 10 : Schéma général de SADT du simulateur WNS-RTIA. ....	116
Figure IV. 12 : Diagramme de classes du simulateur WNS-RTIA. ....	117
Figure IV. 13 : Architecture globale du simulateur WNS_RTIA. ....	119
Figure IV. 14 : Délai Moyen et Maximum d'un paquet avec le protocole MAC 802.11. ....	121
Figure IV. 15 : Taux de paquets reçus avant/après le délai critique avec le protocole MAC 802.11.....	122
Figure IV. 16 : Nombre de collisions produites durant un cycle d'échange de messages temps réel avec le protocole MAC 802.11.....	122
Figure IV. 17 : Délai Moyen et Maximum d'un paquet avec le protocole RT-MAC dans canal parfait. ....	124
Figure IV. 18 : Nombre de paquet livrés avant leurs dates limites avec le protocole RT-MAC dans canal parfait. ....	124
Figure IV. 19 : Délai Moyen et Maximum d'un paquet avec le protocole RT-MAC dans un canal bruité. ....	125
Figure IV. 20 : Taux de succès (paquets avec échéance respectée) et de perte (paquets erronés) avec le protocole RT-MAC dans un canal bruité. ....	125

## Liste des tableaux

Tableau IV.1 : Classes de trafic temps réel selon les caractéristiques et les contraintes temporelles. ....	96
Tableau IV.2 : Classes de trafic retenues après la première réduction selon les familles et sous familles des paramètres temporels .....	97
Tableau IV.3 : Classes de trafic à considérer dans RT-MAC. ....	98
Tableau IV.4 : Paramètres de la couche MAC et PHY (HR-DSSS).....	114

## Introduction générale

L'évolution technologique de ces dernières années, en particulier dans les réseaux locaux de communication, a induit le grand développement de systèmes distribués temps-réel dans de nombreux domaines du secteur industriel. Les applications réalisées sur ces systèmes sont soumises le plus souvent à de fortes contraintes temporelles ; de ce fait, la propriété essentielle que doit assurer le fonctionnement de ces systèmes constitue la justesse temporelle de la fourniture de résultats, de démarrage d'actions et de cessations d'actions. Dans ce contexte de contraintes temporelles et de distribution géographique, l'ordonnancement des interactions entre les différentes tâches distantes, qui coopèrent, est une activité essentielle, dont le bon déroulement est conditionné par le bon déroulement du réseau sous-jacent.

Dans un réseau local, c'est plus précisément la sous-couche MAC qui gère l'accès à la ressource de transmission partagée entre les tâches sur les différents sites, qui est la fonction clef pour garantir l'attribut temps réel au fonctionnement du système. Il est important de bien noter la différence en termes de performance attendues entre un réseau local classique (sans contraintes temporelles) et un réseau local temps réel. Dans un réseau local classique, les performances s'expriment en termes de temps moyen de réponse. Par contre, l'usage de cette notion de temps moyen provoque de graves conséquences dans un contexte réseau local temps réel, où il s'agit avant tout de garantir des temps de réponse bornés supérieurement dans le pire des cas.

Les échanges de données dans les applications industrielles sont caractérisés par des contraintes temps réel qui doivent être respectées par le réseau. Des solutions telles que Profibus, Interbus ou FIPWare par exemple, sont disponibles. Ces réseaux industriels sont essentiellement basés sur l'association d'une technologie filaire et d'une méthode d'accès au médium déterministe. Toutefois, le développement des technologies de réseaux sans fil permet d'envisager leur utilisation dans les situations où elles apportent des avantages en termes de mobilité et de réduction des coûts de câblage. C'est le cas dans les applications industrielles engageant des entités mobiles dans lesquelles le câblage pose des contraintes d'installation et limite la liberté d'action des mobiles. C'est aussi le cas lorsque des applications industrielles sont implantées en milieu à risque pour les hommes ou pour l'environnement. Ces technologies permettent aussi d'envisager de nouvelles applications telles qu'en maintenance dans lesquelles l'opérateur mobile pourra disposer de l'information au bon endroit et au bon moment.

Le support de transmission sans fil étant immatériel, permet de gagner largement en poids, peut traverser des cloisons sans nécessité de perçage et permet une forte mobilité des appareils connectés. En revanche, si les gains sont importants sur ces aspects, l'utilisation du sans fil amène son lot de contraintes qui empêche la transposition directe des mécanismes utilisés sur les bus filaires au sans fil. Par exemple, le phénomène d'aveuglement empêche la détection des collisions en temps réel, la forte variabilité des caractéristiques du médium radio entraîne une grande incertitude sur la fiabilité des liens et la forte atténuation du médium immatériel implique des portées limitées qui ne sont pas toujours simples à appréhender, même avec beaucoup d'expérience.

Dans le cadre d'une application communicante de type industriel, la transmission de l'information doit être fiable. En plus des performances moyennes globalement correctes, certaines applications peuvent nécessiter un moyen d'acheminement de l'information qui soit en mesure de proposer des garanties, par exemple, sur le volume d'informations à transmettre dans un temps donné (débit) ou le délai de remise d'un message (latence). Il est nécessaire d'introduire des fonctionnalités de Qualité de Service pour la gestion du réseau. Pour une application temps réel utilisant des mesures issues de capteurs, l'aspect temporel est primordial car la donnée représentant la grandeur physique mesurée perd sa pertinence avec le

temps ; si le résultat de la mesure arrive avec un délai trop important, il doit être ignoré par l'applicatif car obsolète. Il est donc nécessaire, pour cette catégorie d'applications à très fortes contraintes temporelles, de concevoir des méthodes de transmission permettant de garantir le délai du transport de l'information.

La méthode d'accès au médium (MAC) est le protocole mis en place pour gérer les accès concurrents au médium partagé ; il se situe directement au-dessus de la couche physique et permet de minimiser, voire supprimer, le phénomène de collisions, c'est-à-dire d'empêcher que deux émetteurs utilisent le même médium en même temps. En effet, si plusieurs émetteurs utilisent le médium partagé au même moment, il est probable que la résultante de la communication soit inaudible pour tous les destinataires. Selon les objectifs attendus, le protocole de la méthode d'accès peut être conçu de différentes manières, l'essentiel étant en premier lieu, que toutes les entités susceptibles de s'échanger des messages suivent le même protocole. Pour notre part, nous nous sommes attachés, dans ces travaux de mémoire de Magister, aux méthodes d'accès présentant un caractère déterministe, c'est-à-dire en mesure de proposer des bornes (minimum, maximum) sur l'aspect temporel de la remise des messages.

Les réseaux sans fil sont pour la plupart conformes au standard IEEE 802.11 qui repose sur une méthode CSMA/CA non déterministe. De nombreux travaux ont étudié le moyen d'introduire des mécanismes de qualité de service sur ces réseaux. Mais tous ces travaux visent des applications temps réel non critiques de transport audiovisuel. Les travaux sur le temps réel dur sont moins nombreux. La solution privilégiée est de remplacer CSMA/CA par un accès déterministe. Dans ce mémoire de Magister, nous proposons d'apporter des adaptations protocolaires dans la norme originale IEEE 802.11 afin de supporter les contraintes temporelles des applications industrielles temps réel.

Ce mémoire de Magister est structuré de la manière suivante : dans le premier chapitre, nous présenterons les systèmes distribués temps réel et un panorama de technologies de communication filaires temps réel.

Dans le second chapitre, nous donnerons des motivations pour l'utilisation des réseaux sans fil dans les systèmes automatiques, nous présenterons les réseaux sans fil, et nous préciserons l'orientation de nos travaux.

Dans le troisième chapitre, nous donnerons un aperçu sur le contrôle d'accès au médium et de la qualité de service, nous exposerons les contraintes de la couche MAC des réseaux WLAN sur le plan temporel, et nous présenterons les principales solutions de qualité de service qui sont proposées dans la littérature.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présenterons le protocole MAC que nous proposons pour les systèmes industriels de production, nous décrirons notre outil de simulation (WNS-RTIA), et nous exposerons les résultats de simulation et les analyses correspondantes.

# Chapitre 1

---

## **Systemes distribués temps réel et réseaux de communication filaires temps réel**

---

### **I.1. Introduction**

Le temps réel touche des domaines très variés de la vie quotidienne. On le retrouve dans de multiples applications telles que le guidage ou la navigation (de bateaux, d'avions, de trains, d'automobiles), le contrôle de processus industriels, la robotique, les télécommunications et même les transactions bancaires. Une exigence commune lors de la conception de ces systèmes temps réel est la garantie d'une qualité de service temporelle. Notons que la majorité de ces systèmes informatiques adoptent une structure distribuée. Il est, alors absolument essentiel de spécifier et de réaliser en particulier des réseaux qui soient en adéquation avec les caractéristiques de ces systèmes temps réel.

Dans ce chapitre, nous avons pour objectif de montrer les spécificités des systèmes temps réel (section I.2). Ces systèmes fonctionnent généralement sous une architecture distribuée, où le réseau de communication doit assurer des garanties sur les délais d'acheminement du trafic temps réel, généré par l'application (section I.3). Dans les réseaux locaux, la garantie temps réel sur le transfert de messages contraints temporellement, sont particulièrement à la charge de la couche MAC (section I.4).

## **I.2. Systèmes Temps Réel (STR)**

Cette section sera consacrée à introduire la problématique Temps Réel. Nous donnerons de diverses définitions des systèmes Temps Réel, nous décrirons plus particulièrement les caractéristiques temporelles des applications Temps Réel ainsi que la Qualité de Service temporelles attendues. Nous terminerons par les différentes architectures sous lesquelles les Systèmes Temps Réel s'opèrent.

### **I.2.1. Contexte et Définitions**

Chaque système informatique possède ses propres spécificités, étroitement dépendantes de son domaine d'utilisation. Toutefois, nous pouvons regrouper les applications informatiques parmi les trois catégories suivantes [1][12]. Nous qualifions de :

**Transformationnelles**, toutes les applications permettant d'élaborer un résultat à partir de données connues et disponibles à l'utilisation de l'application. Les applications de calcul scientifique ou de gestion de bases de données sont des exemples représentatifs de cette catégorie d'application.

**Interactives**, toutes les applications permettant de fournir des résultats en fonction de données produites par l'environnement du système (essentiellement imputables à l'utilisateur), dans un délai de production satisfaisant des valeurs moyennes statistiques. Parmi ces applications, les progiciels de bureautique sont certainement les plus connus.

**Réactives**, toutes les applications dont les résultats sont entièrement liés à l'environnement qui leur est connecté. De plus, la dynamique de cet environnement conditionne les instants de production de ces résultats.

Cette dernière catégorie est souvent assimilée aux Systèmes Temps Réel puisque d'une part, elle suggère par le terme réactif, les deux paradigmes essentiels aux Systèmes Temps-Réel : l'*interactivité* et le *temps* et d'autre part l'émergence de l'informatisation du contrôle de procédés de plus en plus complexes contribue à une utilisation en forte croissance de ce type de systèmes. Les domaines concernés vont des chaînes de production [2] [3] [4] [13] aux transports aériens [25] en passant par des robots de plus en plus perfectionnés [17] [18], tels que les modules d'exploration

planétaire [5], l'aide à la conduite automobile ou aux applications multimédia contraintes par le temps [6]. Si le caractère réactif prédomine dans ces exemples, la criticité du temps n'en est pas moins importante pour ces systèmes. En effet, alors que le retard de quelques millisecondes ou la perte d'une trame vidéo sur un réseau ne nuira qu'au confort d'un utilisateur, le retard de la décision de redresser un avion peut provoquer une catastrophe sur le plan humain ainsi que des pertes financières considérables [7] [24].

Il existe de nombreuses définitions des Systèmes Temps Réel. Une première définition tirée de [7], qualifie de Système Temps Réel :

*« Tout système informatique dont le bon fonctionnement ne dépend pas uniquement de la correction algorithmique et logique mais également des dates d'arrivée des résultats ».*

Parmi les systèmes réactifs, la différenciation des Systèmes Temps Réel est ici mise en évidence par la notion d'erreur qui prend également son sens avec le retard de la production de résultats. Toutefois, si la notion de correction temporelle est bien mise en évidence, le caractère réactif n'est pas explicitement défini. Une deuxième approche tente de définir les Systèmes Temps Réel comme étant :

*« Des systèmes ouverts répondant constamment aux sollicitations de leur environnement en produisant des actions sur celui-ci ».*

Ici, nous percevons la notion de servitude vis-à-vis du procédé contrôlé mais l'aspect temporel n'est pas évoqué. C'est au CNRS [8] que nous pouvons enfin trouver la définition suivante qui allie les deux paradigmes primordiaux des systèmes Temps Réel :

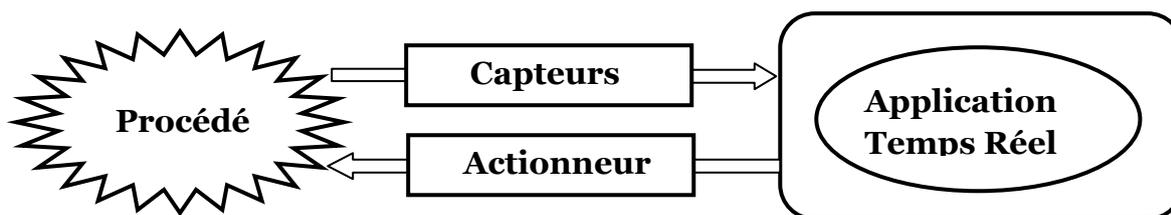
*« Peut être qualifiée de temps réel toute application mettant en œuvre un système informatique dont le fonctionnement est assujéti à l'évolution dynamique de l'état d'un environnement (procédé) qui lui est connecté et dont il doit contrôler le comportement ».*

Pour affiner cette définition en introduisant les notions de critères temporels, nous pouvons citer la définition donnée par [9] :

« Une application temps réel constitue un système de traitement de l'information ayant pour but de commander un environnement imposé en respectant les contraintes de temps et de débit (temps de réponses à un stimulus, taux de perte d'information toléré par entrée) qui sont imposées à ses interfaces avec cet environnement ».

### **I.2.2. Applications Temps-Réel**

Les définitions précédentes des Systèmes Temps Réel ont mis en évidence deux éléments distincts : une ou plusieurs entités physiques constituant le procédé, dont le rôle est d'agir et de détecter, et un contrôle informatique, nommé *contrôleur* ou *application temps réel* qui est le décideur des actions (ou réactions) du procédé. Le contrôleur reçoit des informations sur l'environnement du procédé à l'aide de *capteurs* et commande les changements d'état du procédé via des *actionneurs* [12] [13][15]. La figure I.1 donne un aperçu des interactions qui existent entre procédé et contrôleur d'un système temps réel.



**Figure I.1:** Un système Temps Réel : Interaction procédé-contrôleur.

La notion de capteurs et d'actionneurs introduit implicitement, du point de vue logiciel, l'utilisation de différentes tâches permettant de les piloter. Ce sont des programmes séquentiels dédiés au traitement d'un des composants du Système Temps Réel. Nous caractérisons ainsi une *Application Temps Réel* comme une application multitâches.

Il existe quatre types de tâches en Temps Réel qui diffèrent par leur caractéristiques temporelles [12] [13] :

**Les tâches périodiques :** sont la plupart du temps simulées par l'Horloge Temps Réel (HTR) du système de façon à assurer une activité régulière, par exemple lors de l'acquisition de données ou la génération périodique d'évènements.

**Les tâches apériodiques** : sont quant à elles activées de façon aléatoire en fonction par exemple d'évènement aléatoire.

**Les tâches sporadiques** : c'est une sous famille de tâches apériodiques pour lesquelles une durée minimale sépare deux occurrences successives de l'évènement déclencheur.

**Les tâches cycliques** : sont très proches des tâches périodiques à la différence près que leur activation n'est pas liée à l'Horloge Temps Réel, ce qui induit une périodicité approximative. La durée séparant deux activations successives d'une tâche périodique est constante alors qu'elle appartient à un intervalle  $[P_{min}, P_{max}]$  pour les tâches cycliques.

Nous donnerons ci-après les modèles temporels des tâches périodiques, apériodiques et sporadiques [12][13].

### **Modèle temporel d'une tâche périodique**

Soit  $\mathcal{T}_i$  une tâche périodique. Elle est modélisée par quatre paramètres temporels :

$$\langle r_i, C_i, D_i, T_i \rangle$$

Avec :

- $r_i$  la date à laquelle la première instance de  $\mathcal{T}_i$  est activée ;
- $C_i$  la pire durée d'exécution (ou charge maximale) de  $\mathcal{T}_i$  [19] [23];
- $D_i$  le délai critique (ou échéance relative) associé à  $\mathcal{T}_i$  ;
- $T_i$  la période de la tâche  $\mathcal{T}_i$ .

### **Modèle temporel d'une tâche apériodique et sporadique**

Soit une tâche  $\mathcal{T}_i$ .

- Si  $\mathcal{T}_i$  est une **tâche apériodique**, alors  $\mathcal{T}_i$  est modélisée par un unique paramètre temporel :  $C_i$  sa pire durée d'exécution [19] [23].
- Si  $\mathcal{T}_i$  est une **tâche sporadique**, alors  $\mathcal{T}_i$  dans le cas général par :

$$\langle C_i, D_i, Ts_i \rangle$$

Où  $Ts_i$  correspond à l'intervalle de temps minimum séparant deux activations successives et  $D_i$  au délai critique.

Les modèles de tâches possédant un paramètre de délai critique  $D_i$ , peuvent être classifiés en trois catégories suivant les relations existant entre  $D_i$  et  $T_i$  [12][13]:

**Tâche à échéance non relié à la période :** Aucune relation n'existe entre  $D_i$  et  $T_i$  donc tous les cas sont possibles.

**Tâche à échéance inférieure à la période :** Toutes les tâches vérifiant la relation  $D_i \leq T_i$  rentrent dans cette catégorie.

**Tâche à échéance égale à la période :** Cette catégorie regroupe toutes les tâches vérifiant la relation  $D_i = T_i$ . Nous parlerons alors de tâches à échéance sur requête.

### **I.2.3. Qualité de service temporelle**

Dans le paragraphe précédent, nous avons défini les paramètres temporels caractérisant une tâche. Il nous faut maintenant indiquer la nature des contraintes qu'ils engendrent. En effet, les systèmes temps réel n'ont pas tous le même degré d'exigence vis-à-vis de ces critères. Si nous considérons un système critique embarqué dans un avion, il est vital que les tâches d'un tel système aient des temps de réponses rigoureusement contrôlés, inférieurs systématiquement à une borne fixée (exprimée par le délai critique des tâches) [14]. Au contraire, un retard de réaction lors de la compression vidéo [10] [11] n'entraîne aucune catastrophe, ni même de perturbation sensible si ce retard n'intervient pas trop souvent. Cette constatation permet de définir des classes de systèmes temps réel suivant le degré de criticité de leur qualité de service. On distingue ainsi trois familles de systèmes temps réel suivant la rigidité des contraintes temporelles qui leurs sont imposées. Celles-ci sont définies comme suit [12][13] [22]:

**Les Systèmes Temps Réel à Contraintes Strictes :** Ce type de système impose que toutes les contraintes temporelles soient impérativement respectées.

**Les Systèmes Temps Réel à Contraintes Souples :** À l'opposé de la classe précédente, un non respect d'une échéance n'entraîne pas la défaillance du système. Ces dépassements sont donc tolérés mais entraîne des perturbations qu'il faudra alors minimiser.

**Les Systèmes Temps Réel à Contraintes Mixtes :** Ces derniers sont soumis à la fois aux exigences des systèmes à contraintes strictes pour certaines tâches et à celles des systèmes à contraintes souples pour d'autres [16].

Les Systèmes Temps Réel à Contraintes Strictes ont un comportement déterministe. Nous pouvons les rencontrer dans des systèmes du domaine de l'embarqué comme l'avionique, la robotique, les systèmes ABS etc.... Les Systèmes Temps Réel à Contraintes Souples dont la mesure d'efficacité s'opère généralement par une analyse statistique des temps de réponse moyen peuvent se rencontrer dans les systèmes du traitement multimédia comme le "streaming" par exemple. Enfin, les Systèmes Temps Réel à Contraintes Mixtes regroupent des applications Temps Réel composées de tâches dont un sous ensemble doit impérativement respecter des contraintes temporelles, à l'inverse des autres tâches dont le critère d'évaluation cherchera à minimiser les fautes temporelles. Ces systèmes regroupent la plupart des systèmes temps réel actuels.

Afin d'assurer une qualité de service temporelle aux applications Temps Réel, un algorithme d'ordonnancement doit être conçu et mis en œuvre [13][12]. Nous considérons ici les algorithmes à priorité, c'est-à-dire où une priorité qui dépend des caractéristiques temporelles est associée à chaque tâche. Une priorité peut être *statique* (elle ne varie pas au cours de la vie de la tâche) ou *dynamique* (elle évolue au cours de la vie de la tâche).

Un algorithme d'ordonnancement doit, à un instant donné, choisir la tâche la plus prioritaire à exécuter par le processeur. En ce qui concerne ce choix, on distingue deux grandes classes d'algorithmes qui diffèrent sur la connaissance que l'ordonnanceur possède sur les tâches avant de commencer l'application [13]:

***Dans les algorithmes hors-ligne,*** toutes les tâches et leurs paramètres temporels sont supposés connus avant le démarrage de l'application. Il est alors possible de construire une séquence d'exécution de travaux et de vérifier hors-ligne que toutes les contraintes temporelles sont satisfaites. Les travaux sont exécutés dans l'ordre préétabli sans que cet ordre puisse être modifié. Cette approche ne permet donc pas de tenir en compte de l'éventuelle occurrence en-ligne de tâches inconnues au préalable.

**Dans les algorithmes en-ligne**, seuls les paramètres temporels des tâches prêtes à un instant donné suffisent pour générer une séquence à appliquer aux instants suivants. Une tâche apériodique peut donc être prise en compte et exécutée dès son occurrence.

Par opposition aux algorithmes hors-ligne, les algorithmes en-ligne construisent une séquence dynamiquement. Dans un contexte Temps Réel Stricte (Dur), où toutes les contraintes doivent être impérativement satisfaites, il ne peut y avoir de démarrage de l'application sans certitude sur le respect de toutes les échéances. Il apparaît donc nécessaire de développer des tests d'ordonnabilité pour tout algorithme en-ligne. Ces tests portent sur les caractéristiques temporelles des tâches et permettent, lorsqu'ils sont satisfaits de garantir le respect de toutes les contraintes temporelles avant le démarrage de l'application. Dans ce mémoire de Magister, nous ne rentrerons pas plus en détails dans les algorithmes d'ordonnement des tâches temps réel, le lecteur intéressé pourra consulter les références suivantes [14][12][17][20] [21].

#### **I.2.4. Architecture des Systèmes Temps Réel**

Les Systèmes Temps Réel peuvent être classés selon leur couplage avec des éléments matériels avec lesquels ils interagissent. Ainsi, l'application concurrente et le système d'exploitation qui lui est associé peuvent se trouver [12]:

- soit directement dans le procédé contrôlé : c'est ce que l'on appelle des systèmes embarqués (embedded systems). Le procédé est souvent très spécialisé et fortement dépendant du calculateur. Les exemples de systèmes embarqués sont nombreux : contrôle d'injection automobile, stabilisation d'avion, électroménager etc.... C'est le domaine des systèmes spécifiques intégrant des logiciels sécurisés optimisés en encombrement et en temps de réponse.
- soit le calculateur est détaché du procédé : c'est souvent le cas lorsque le procédé ne peut être physiquement couplé avec le système ou dans le cas général des contrôles/commandes de processus industriels. Dans ce cas, les applications utilisent généralement des calculateurs industriels munis de systèmes d'exploitation standards ou des automates programmables industriels comme dans les chaînes de montage industrielles par exemple [15].

En introduisant la notion de calculateur ou de processeur, nous distinguons trois grandes catégories d'architectures matérielles pour les Systèmes Temps Réel en fonction de leur richesse en terme de nombre de cartes d'entrée/sortie, de mémoires, de processeurs et de la présence de réseaux.

**L'architecture monoprocesseur** : un unique processeur exécute toutes les tâches de l'application concurrente. Dans ce cas, la notion de parallélisme n'a plus vraiment de sens puisque le temps processeur est partagé entre toutes les tâches. Nous parlons plutôt de pseudo-parallélisme ou d'entrelacement des exécutions. En effet, le parallélisme des tâches semble réel à l'échelle de l'utilisateur mais le traitement sur l'unique processeur s'opère de façon séquentielle.

**L'architecture multiprocesseur** : l'exécution de toutes les tâches est ici répartie sur n processeurs partageant une unique mémoire centrale. La coopération entre tâches se fait par partage des informations placées en mémoire. Le traitement est donc ici réellement parallélisé.

**L'architecture distribuée** : c'est le cas des architectures multiprocesseurs ne partageant pas de mémoire centrale. Ces processeurs sont reliés entre eux par l'intermédiaire de réseaux permettant d'assurer les communications entre les différentes tâches. Une ferme d'ordinateurs est un exemple typique de cette architecture. La coopération se fait ici par envoi/réception de messages via un réseau de communication.

Dans la suite de ce mémoire de magister, nous nous intéresserons à l'architecture distribuée des Systèmes Temps Réel où un réseau de communication reliant les différentes tâches distantes est un élément fondamental à spécifier et à étudier. Cette catégorie de systèmes est dite généralement Systèmes Distribués Temps Réel [26]. Nous trouvons aussi dans la littérature que certains auteurs les appellent par des Systèmes contrôlés en Réseau [27] ou encore des Systèmes Commandés par Réseau [28].

### **I.3. Systèmes Distribués Temps Réel (SDTR)**

Dans cette section, nous donnerons l'architecture d'un Système Distribué Temps Réel en montrant les différents éléments qui le composent. Ensuite, la

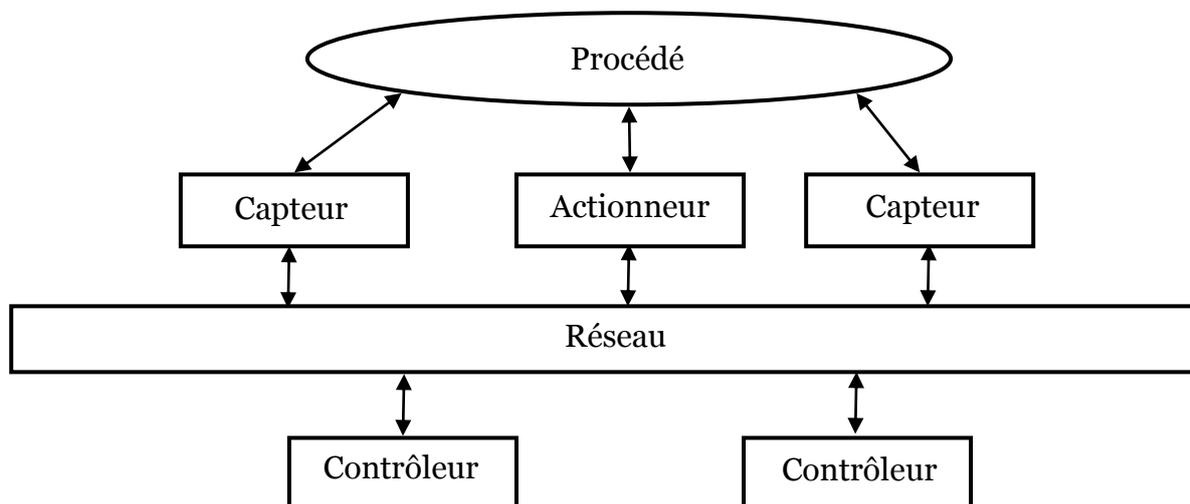
problématique générale des Systèmes Distribués Temps Réel est développée. Enfin, nous montrerons l'impact des performances du réseau sur les performances du système Temps réel.

### **I.3.1. Eléments et Structures d'un SDTR**

Les Systèmes Distribués Temps réel (ou encore dits Systèmes Contrôlés/Commandés en réseau) [29][37][38][42] sont des systèmes automatiques traditionnels où des capteurs, contrôleurs, actionneurs et autres composants sont distribués autour d'un médium de communication (voir Figure I.2). Les capteurs, contrôleurs et actionneurs constituent avec les systèmes de communication les éléments d'un SDTR.

Le médium de communication sert à assurer les fonctions suivantes :

- Etablir un lien de communication pour envoyer l'information entre chaque producteur et les consommateurs concernés ;
- Respecter les contraintes de temps réel imposées par l'application ;
- Faciliter la maintenance (détection de fautes et réparation) ;
- Participer à la reconfiguration (réorganisation des échanges suite à la défaillance d'un composant ou suite à l'adjonction d'un nouveau composant).

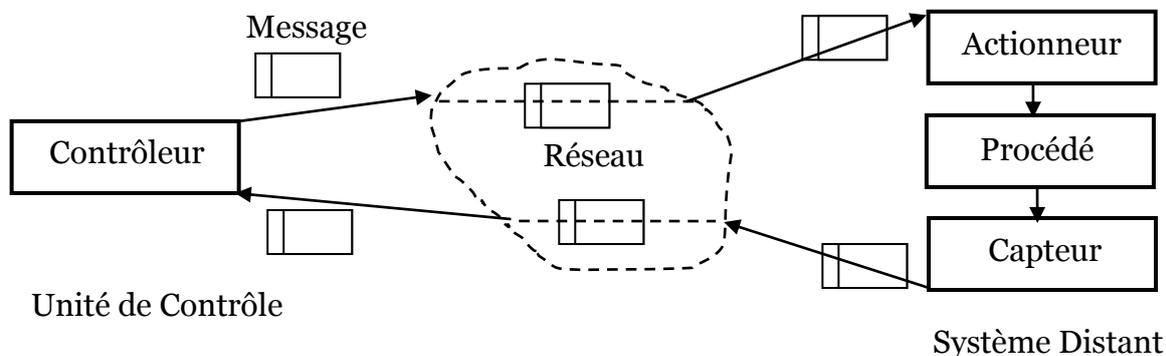


**Figure I.2:** Installation typique d'un Système Distribué Temps Réel.

Deux configurations générales typiques des SDTRs sont présentées dans ce qui suit :

**Structure Directe :** Le SDTR dans la structure directe se compose d'un contrôleur et d'un site distant contenant un système physique, des capteurs, des actionneurs et

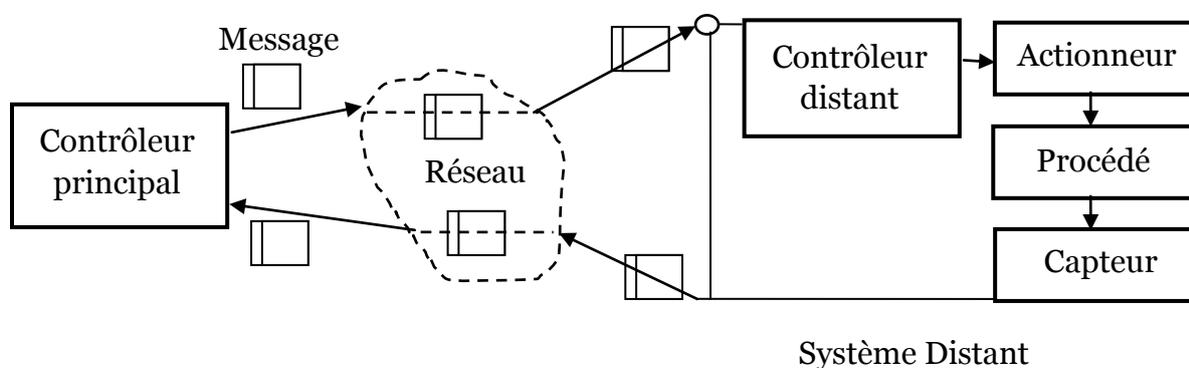
d'autres composants. Le contrôleur et le système distant sont physiquement situés à différents endroits et sont directement liés par un réseau de communication. Afin d'effectuer la commande en boucle fermée à distance comme cela est illustré dans la figure I.3, Le signal de la commande est encapsulé dans un message et envoyé au système distant par l'intermédiaire du réseau.



**Figure I.3 :** Structure Directe d'un Système Distribué Temps Réel.

Le système distant renvoie alors la sortie du système au contrôleur mettant la mesure du capteur dans un message destiné au contrôleur. Plusieurs contrôleurs peuvent être implémentés dans une seule unité de commande pour commander plusieurs boucles fermées dans une structure directe. Des exemples de SDTRs utilisant la structure directe peuvent être trouvés dans [30] [31].

**Structure Hiérarchique :** La structure hiérarchique de base se compose d'un contrôleur principal et d'un système à distance contenant un contrôleur (contrôleur distant), un capteur et un système physique à réguler (voir Figure I.4). Périodiquement, le contrôleur principal calcule et envoie la consigne dans une trame par l'intermédiaire d'un réseau.



**Figure I.4:** Structure Hiérarchique d'un Système Distribué Temps Réel.

Le système distant traite la consigne pour effectuer localement la commande en boucle fermée et renvoie la mesure du capteur au contrôleur principal. Le contrôleur distant doit satisfaire les performances de la boucle fermée avant de recevoir le message du contrôleur principal. Cette structure est employée dans plusieurs applications comme celles des robots mobiles [32] et de télé-opération [33].

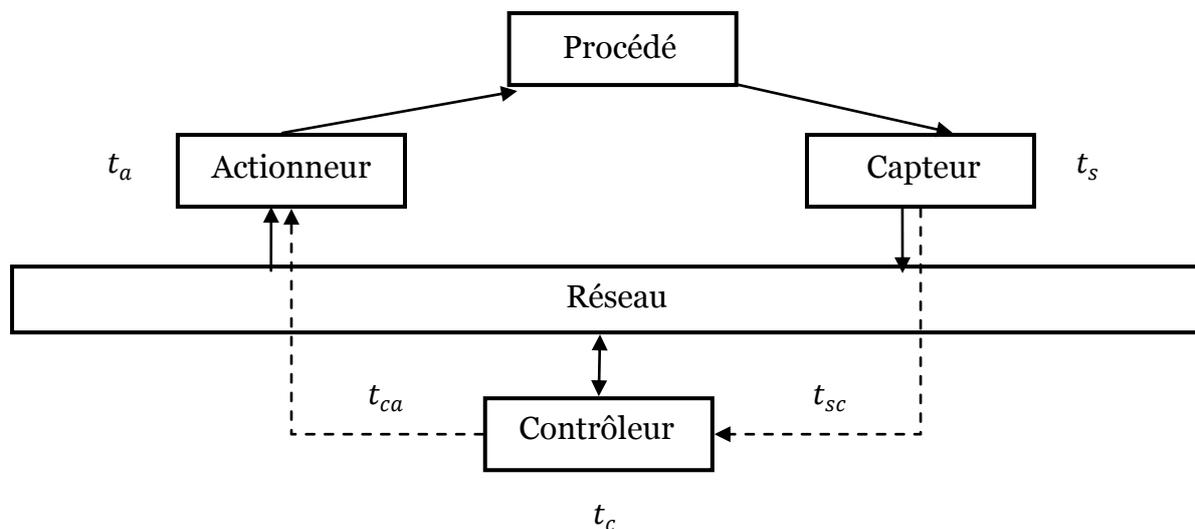
L'utilisation de l'une de ces deux structures dépend de l'application et de sa conception. Par exemple commander un robot, ou un bras en robotique exige l'utilisation de beaucoup de moteurs qui doivent fonctionner ensemble et simultanément. Donc, il est plus approprié d'utiliser une commande principale du robot et de formuler le système contrôlé en réseau en utilisant une structure hiérarchique. Par opposition, lorsque le système est plus simple ou lorsque les temps de réponse exigés par le contrôleur principal doivent être plus rapide tel qu'un système de commande de vitesse d'un moteur en réseau, la structure directe est préférable.

### **I.3.2. Problématique des Systèmes Distribués Temps Réel**

Un point important à considérer en étudiant les SDTRs est que le comportement et la performance du système dépendent largement des caractéristiques et de la qualité de service du réseau, comme le mode d'accès au médium, la largeur de la bande passante et le trafic sur le réseau [34]. Dans les applications de commande, les réseaux candidats doivent chaque fois que c'est possible vérifier deux contraintes : des délais bornés et une transmission garantie, c'est-à-dire qu'un message doit être envoyé et consommé avant des dates limites fixées par avance. Ces contraintes motivent l'utilisation des réseaux de communication avec des modes d'accès au médium déterministe capables d'ordonnancer l'accès des messages au canal de telle manière à satisfaire les exigences de temps réel.

L'analyse et la conception des systèmes en boucle fermée font référence à la théorie de la commande. Généralement les processus à contrôler sont de nature continue, l'utilisation des ordinateurs et des réseaux dans la boucle de commande demande la discrétisation du temps, ce qui implique que les variables du système ne sont connues qu'à des instants donnés. Dans les boucles fermées distribuées autour

d'un réseau, les informations sont envoyées sur le réseau ; les activités suivantes sont exécutées à chaque période d'échantillonnage (voir Figure 1.5) :



**Figure I. 5 :** Délais dans une boucle de régulation.

Le capteur prélève des mesures sur le système commandé et prépare un message pour être envoyé via le réseau à destination du contrôleur. Cette tâche inclut la conversion analogique-numérique et la préparation du message (encapsulation des données dans une trame). Le temps de cette tâche entraîne un retard  $t_s$ . Ce retard peut être considéré comme constant et dépend des caractéristiques physiques et de l'architecture numérique du capteur ;

- Le message du capteur est envoyé à travers le réseau au contrôleur. Cette tâche induit un délai de transmission  $t_{sc}$ . Ce délai dépend de la taille du message, du trafic circulant sur le réseau, du protocole et du medium de communication.
- A la réception d'un message de la part du capteur, le contrôleur, suivant son algorithme de commande, élabore une nouvelle commande pour l'envoyer à l'actionneur : le temps de calcul et le temps de codage induisent un nouveau retard  $t_c$ .
- De même le message du contrôleur subit un délai avant de gagner l'accès au medium suivi du temps de transmission : le temps total est désigné par  $t_{ca}$ .
- L'actionneur reçoit le message du contrôleur, décode le message et, après la conversion numérique analogique, applique la commande sur le processus. Ce nouveau délai au niveau de l'actionneur est noté  $t_a$ .

Les délais de transmission sur le médium de communication sont rarement constants, ils sont variables selon le protocole utilisé et le trafic circulant sur le

médium ; ces messages peuvent subir des délais aléatoires voire des pertes. L'environnement extérieur peut également avoir des conséquences sur ces délais, comme les perturbations électromagnétiques et d'autres perturbations qui peuvent affecter des messages en transmission, ce qui nécessite des retransmissions qui entraînent des délais supplémentaires.

Plusieurs études ont traité des problèmes liés aux Systèmes Distribués Temps Réel [27][38][39][40][15][16][41]. Dans [35], les auteurs notent deux approches dans l'accommodation des SDTRs aux problèmes posés par le réseau. Une première solution consiste à concevoir un système de commande indépendant des délais et des pertes mais de concevoir un protocole de communication qui en minimise l'occurrence (*control of network*). La seconde approche revient à traiter le protocole réseau et le trafic comme des conditions données et de concevoir des stratégies adéquates avec ces informations (*control over network*).

Dans ce mémoire de Magister, nous nous intéressons à la stratégie *contrôle du réseau* qui consiste à concevoir un réseau qui répond au mieux à la qualité de service exigée par l'application, il s'agit de gérer au mieux les ressources de communication afin de répondre aux besoins de l'application de commande en minimisant les retards et les probabilités de perte des messages. Le paragraphe suivant sera consacré à exprimer les paramètres de la qualité de service ainsi que ceux de la qualité de performances exigés et attendus du réseau de communication.

### **I.3.3. Qualité de Service d'un SDTR**

Le réseau de communication sert à transmettre les messages entre les différents composants d'une application. Selon l'application qu'il soutient le réseau est amené à répondre à des qualités de service exigées par cette dernière.

#### **I.3.3.1. Paramètres de Qualité de Service**

**Délai :** Lors d'une transmission via un réseau on peut distinguer plusieurs délais :

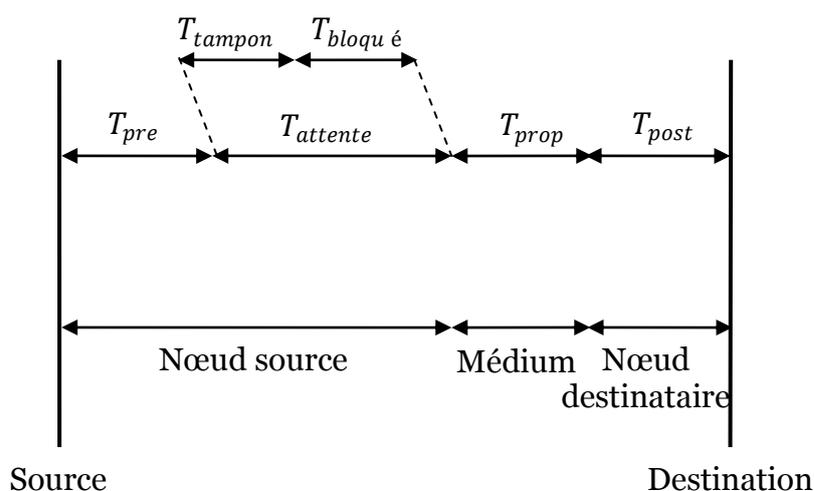
- Les délais de la station émettrice ;
- Les délais de transmission sur le réseau ;
- Les délais à la station réceptrice.

Avant d'être reçu, chaque message a subi un certain nombre de retards :

- $T_{pre}$  temps nécessaire au codage dans la station source ;

- $T_{tampon}$  temps d'attente dans la station source avant l'émission nécessaire au vidage de la file d'attente (tampon) ;
- $T_{bloqué}$  temps d'attente d'accessibilité au médium (disponibilité et droit d'accès),
- $T_{prop}$  durée de la transmission sur le médium.

Une fois que le message est reçu par la station destinatrice, le décodage du message nécessite un temps  $T_{post}$  avant d'être prêt à la consommation (voir Figure 1.6).



**Figure I. 6 :** Délais de bout en bout.

Le délai est le paramètre le plus important pour les applications temps réel, il est défini comme étant l'intervalle de temps entre le moment de production d'une information jusqu'à l'arrivée de celle-ci à son destinataire :

$$T_{délai} = T_{pre} + T_{tampon} + T_{bloqué} + T_{prop} + T_{post} \quad (I.1)$$

**Gigue :** La gigue est aussi une métrique importante pour les applications temps réel. Elle se réfère généralement à la variation du délai, entre le délai maximum et le délai minimum.

**Taux de pertes :** Le taux de pertes représente le pourcentage des messages qui ne peuvent pas atteindre leur destination dans un intervalle de temps spécifique. Cette perte peut être le résultat d'un rejet de paquets lorsque les ressources sont saturées (indisponibles) ou d'un dépassement d'échéance.

### **I.3.3.2. Indices de Qualité de Performance**

Dans ce paragraphe, nous présentons les paramètres de performances du réseau [36]. Ces paramètres sont liés à ceux de la qualité de service de l'application et servent à donner une image de l'état du réseau.

**Temps moyen de retard (Total Average Delay) :** Pour une durée déterminée  $T_{total}$ , on peut calculer la somme  $T_{delai}^{somme}$  et la moyenne  $T_{delai}^{moyen}$  des délais que subit chaque nœud sur le réseau :

$$T_{delai}^{somme} = \sum_{i \in N_{node}} \sum_{j=1}^{M(i)} T_{delai}^{(i,j)} \quad (I.2)$$

$$T_{delai}^{moyen} = \frac{1}{N} \sum_{i \in N_{node}} \left[ \frac{\sum_{j=1}^{M(i)} T_{delai}^{(i,j)}}{M(i)} \right] \quad (I.3)$$

Où  $N$  est le nombre total de nœuds sur le réseau,  $N_{node}$  est l'ensemble des nœuds du réseau, et  $M(i)$  est le nombre de messages envoyés par le  $i^{ème}$  nœud.  $T_{delai}^{(i,j)}$  est le délai du  $j^{ème}$  message envoyé par le  $i^{ème}$  nœud.

Si un nœud  $i$  envoie un message périodiquement, le nombre de messages envoyés par celui-ci est donné par la formule :

$$M(i) = \left\lfloor \frac{T_{total}}{T_{per}^{(i)}} \right\rfloor \quad (I.4)$$

Où  $T_{per}^{(i)}$  représente la période d'envoi du nœud  $i$  et  $T_{total}$  est le temps total de l'observation.

**Efficacité des réseaux (Efficiency of networks) :** L'efficacité du réseau  $P_{eff}$  est définie comme étant le rapport entre le temps de transmission des messages (somme des temps de transmission de l'ensemble des messages pour l'ensemble des nœuds, avec  $T_{prop}^{(i,j)}$  représentant le temps de transmission, du  $j^{ème}$  message du  $i^{ème}$  nœud) et le temps total  $T_{delai}^{somme}$  pris pour transmettre les messages y compris les temps d'attente.

$$P_{eff} = \frac{\sum_{i \in N_{node}} \sum_{j=1}^{M(i)} T_{prop}^{(i,j)}}{T_{delai}^{somme}} \quad (I.5)$$

Ainsi, si  $P_{eff} \rightarrow 1$ , la plus grande partie du délai vient des délais de transmission et la performance du réseau est acceptable. Dans le cas contraire  $P_{eff} \rightarrow 0$ , la performance du réseau est mauvaise puisque des délais d'attente dus à des collisions prennent la majorité sur le temps de transmission.

**Utilisation du réseau :** l'utilisation du réseau  $P_{util}$  est définie par le rapport entre le temps total de transmission et le temps total de l'observation  $T_{total}$  en prenant en compte la retransmission éventuelle de messages.

$$P_{util} = \frac{\sum_{i \in N_{node}} \sum_{j=1}^{M(i)} (T_{prop}^{(i,j)} + T_{reprop}^{(i,j)})}{T_{total}} \quad (I.6)$$

Où  $T_{reprop}^{(i,j)}$  est le temps pris pour retransmettre le  $j^{ème}$  message du  $i^{ème}$  nœud. Si  $P_{util} \rightarrow 0$ , il y a suffisamment de bande passante pour d'autres applications et de nouveaux nœuds peuvent partager le réseau. Par contre si  $P_{util} \rightarrow 1$ , cela veut dire que le réseau est presque saturé.

**Stabilité du réseau :** la stabilité du réseau est définie par le nombre de messages dans les tampons de chaque nœud, si ce nombre atteint un nombre donné, le réseau est instable. La stabilité du réseau est directement liée à la perte des messages. En général, les tampons sont limités et une fois que les tampons sont saturés, des messages vont être supprimés pour les libérer.

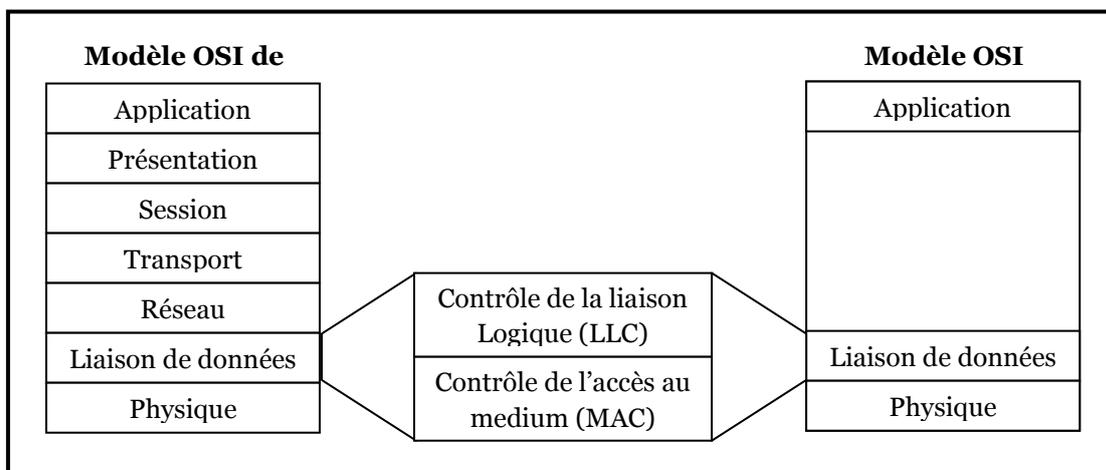
## **I.4. Réseaux de Communication Filaires Temps Réel :**

Cette section sera consacrée à la présentation des principaux protocoles MAC Temps Réel connus dans le monde des réseaux de communication filaires.

### **I.4.1. Architecture des réseaux de communication Temps Réel**

L'architecture la plus générale d'un réseau de communication est une architecture à sept couches basée sur le modèle ISO de l'OSI [43]. Cependant, dans le

contexte des réseaux locaux temps réel, l'analyse de l'architecture de communication est souvent limitée à trois couches (voir Figure I.7).



**Figure I. 7 :** Le modèle de référence OSI de l'ISO.

**La couche physique :** gère les connexions physiques pour la transmission de bits à travers le médium de communication ;

**La sous-couche LLC :** fournit les fonctions de liaisons de données, de gestion des erreurs et de contrôle de flux ;

**La sous-couche MAC :** gère l'accès au médium à l'aide d'un protocole de communication ;

**La couche application :** fournit les services nécessaires à la gestion des tâches et du contrôle.

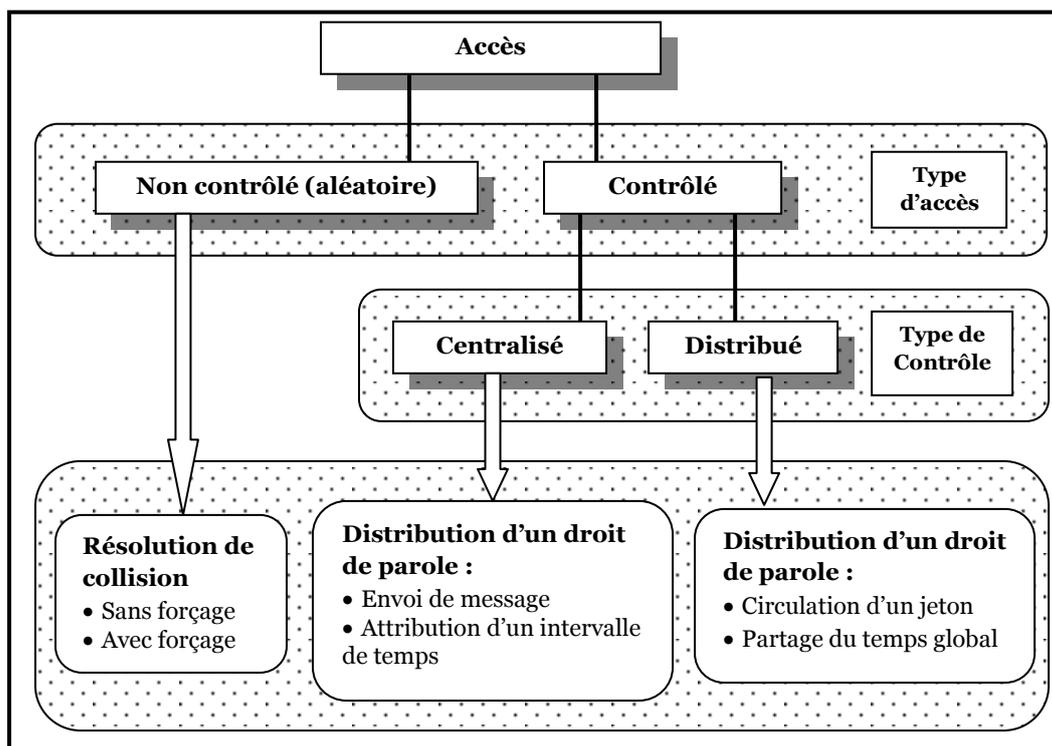
La sous-couche MAC, qui gère l'accès à la ressource de transmission (ressource commune à toutes les stations, et donc à toutes les tâches), est la fonction essentielle pour permettre le déroulement temps réel des applications.

#### **I.4.2. Protocoles MAC Temps Réel**

D'une manière générale, les messages venant des applications et soumis au service MAC peuvent être classés soit comme des messages Temps Réel (contraintes strictes ou souples associés au transfert), soit comme des messages Non Temps Réel (pas de contraintes associées au transfert). Ci-après, nous présentons deux classifications de protocoles MAC temps réel suivies des exemples de protocoles illustrant chacune de ces classes.

### I.4.2.1. Classification des protocoles MAC Temps Réel

Les protocoles du niveau MAC ont pour objectif de résoudre les conflits d'accès au médium entre les sites. Beaucoup de recherches sont faites en vue de l'adaptation de la couche MAC pour la prise en compte des contraintes de temps des messages [44]. L'accès au médium peut être réalisé de différentes manières, chacune correspondant à une classe de protocoles de communication (voir Figure I.8).



**Figure I. 8 :** Protocoles MAC Temps Réel selon la technique d'accès.

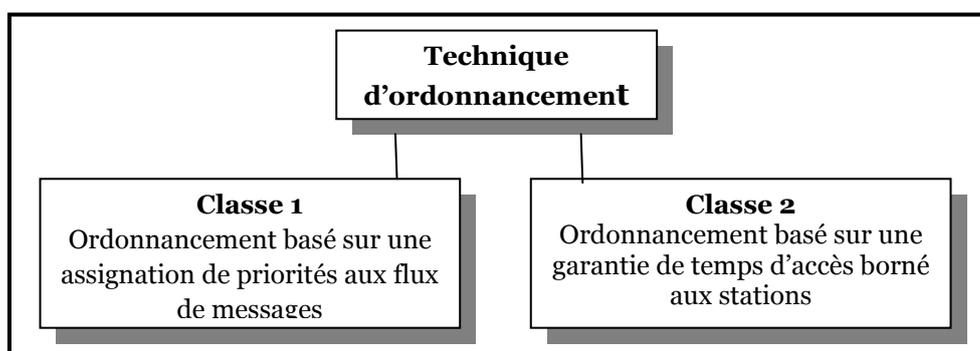
**L'accès non contrôlé :** C'est une technique basée sur un principe de compétition puisqu'il s'agit, pour chaque site, d'émettre lorsqu'il le souhaite à condition le bus soit libre.

**L'accès à contrôle centralisé :** Il suppose l'existence d'un site de contrôle qui distribue un droit de parole aux autres sites faisant partie du réseau. C'est le cas par exemple de World FIP où un site de contrôle envoie à chaque site un message l'autorisant à utiliser le médium.

**L'accès à contrôle distribué :** Il suppose la coopération des sites en vue de déterminer celui qui a le droit d'utiliser le médium. La technique du jeton circulant est un exemple de mécanisme de coopération explicite des sites (cas de FDDI) et la

technique du partage du temps global en intervalles de temps alloués aux différents sites est un exemple de coopération implicite (cas de TDMA).

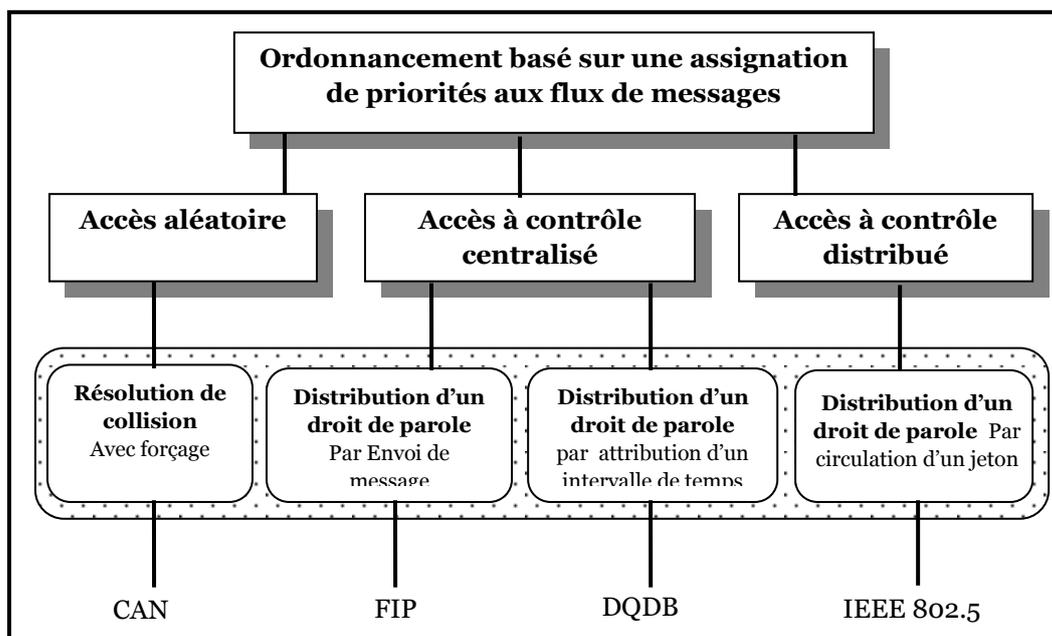
Cependant, dans la littérature on peut trouver aussi d'autres classifications de protocoles MAC temps réel se basant sur d'autres aspects, outre celui de la technique d'accès. Ci-après, nous présentons la classification proposée dans [13]. Dans cette classification, l'auteur a tenu en compte de la spécificité d'ordonnancement des messages au niveau MAC et a défini deux grandes classes de protocoles MAC temps réel (voir la figure I.9), selon que l'ordonnancement est mis en œuvre sur les flux de messages ou sur les stations :



**Figure I. 9 :** Protocoles MAC temps réel selon la technique d'ordonnancement.

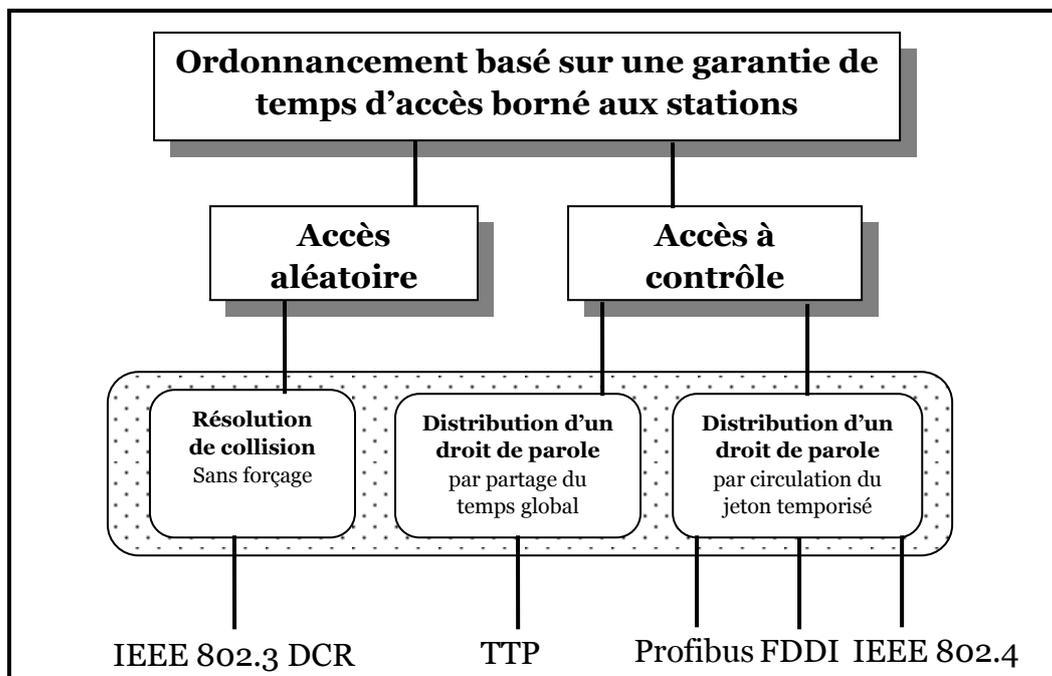
**La classe 1 :** cette classe est relative aux protocoles réalisant un ordonnancement basé sur une assignation de priorité aux flux de messages (priorité traduisant les contraintes temporelles) ; les protocoles MAC de la classe 1 travaillent à partir des contraintes temporelles des flux de messages, qu'ils interprètent et qu'ils utilisent pour réaliser l'ordonnancement (ordonnancement global) et les transferts. La figure I.10 illustre les principales normes faisant partie de cette classe.

**La classe 2:** Elle est relative aux protocoles réalisant un ordonnancement basé sur la notion d'une garantie d'un temps d'accès borné aux entités MAC (donc aux stations) ; dans ce cas le protocole MAC offre simplement un service d'accès, en temps borné et en exclusion mutuelle, à la ressource de transmission ; ce service doit être utilisé par le(s) niveau(x) supérieur(s) au niveau MAC, qui doit (doivent) mettre en œuvre l'ordonnancement des flux de messages pendant le temps d'accès (ordonnancement local). Les principales normes de cette classe sont représentées sur la figure I.11.



**Figure I. 10** : protocoles MAC Temps Réel de la classe 1.

Comme nous venons de le constater, il existe toute une panoplie de protocoles MAC temps réel. Dans ce qui suit, nous contentons simplement de décrire quelques un relativement aux classes de techniques d'accès.



**Figure I. 11** : Les protocoles MAC temps-réel de la classe 2.

#### **I.4.2.2. Protocoles basés sur la compétition**

**Protocole CAN :** CAN est un bus à diffusion [45]. Les sites ne possèdent pas d'adresses et accèdent au bus en utilisant la technique CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) en version CSMA/BA (Carrier Sense Multiple Access/Bit wise Arbitration). Chaque site comporte un contrôleur CAN qui assure l'interface avec le bus. Une trame contient au plus 8 octets d'information utile et des champs de contrôle dont notamment un identificateur sur 11 bits. L'identificateur est utilisé d'une part pour filtrer les trames à la réception et d'autre part pour contrôler l'accès au bus en assignant une priorité à toute trame. En effet, si un site parmi un ensemble de sites émetteurs émet un bit 0 alors tous les sites verront 0 (dit bit dominant) sur le bus. Inversement, les sites verront 1 uniquement lorsque tous les sites émetteurs transmettront un bit 1 (dit bit récessif). Le bus se comporte comme un ET logique, seule la trame de plus haute priorité (ayant le plus petit identificateur) sera envoyée, car les autres sites qui émettent des bits récessifs se retirent de la compétition lorsqu'ils détectent un bit dominant sur le bus.

**Protocole CSMA/DCR:** Le protocole CSMA/DCR (Carrier Sense Multiple Access/Deterministic Collision Resolution) reprend le principe de base de la méthode CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detection) normalisée [40] et est utilisé sur un réseau composé de sites connectés sur un bus. Lorsqu'un site émet une trame, il écoute le support en même temps qu'il transmet. S'il ne détecte pas de collision durant la transmission, il conclut que la trame est émise avec succès, sinon il attend un temps aléatoire avant de tenter une nouvelle émission. Ce protocole est dit déterministe car il résout le problème de collisions en autorisant tous les sites à émettre dans un ordre défini grâce à un découpage dichotomique basé sur les adresses des sites. Ainsi pendant toute la phase de résolution de conflit, appelée époque, tous les sites vont pouvoir émettre dans un ordre fixé et avec un délai maximum connu suivant la position de chacun.

#### **I.4.2.3. Protocoles à contrôle centralisé: exemple de World FIP**

World FIP (*Factory Instrumentation Protocol*) [15] est un réseau de terrain qui assure le transfert d'informations entre les équipements (capteurs, actionneurs, régulateurs, unités de commande, etc.) reliés à un bus. Il existe deux types de service de transmission: la transmission de variables (service MPS: services

périodiques/apériodiques industriels) et la transmission de messages (service MMS: service de messagerie). Les variables de nature périodique ou apériodique représentent les données échangées pour le contrôle d'un procédé. Les messages permettent de gérer la configuration du système de contrôle et sont de nature plutôt apériodique. L'ordonnancement des échanges de variables et de messages est défini et mis en œuvre dans un contrôleur central appelé *arbitre de bus*. Il consiste à construire, hors ligne, une table de scrutation qui sera mise à jour, en ligne, par l'arbitre de bus pour gérer le trafic périodique et apériodique.

#### **I.4.2.4. Protocoles à contrôle distribué**

**Protocole FDDI:** FDDI (Fiber Distributed Data Interface) est un réseau à contrôle d'accès par jeton proche de la norme « Anneau à jeton IEEE 802.5 » [13]. Il est basé sur la considération de deux types de trafic: le trafic synchrone soumis à des contraintes temporelles et le trafic asynchrone qui désigne un trafic non contraint temporellement. Le principe du protocole est d'allouer à chaque site une durée prédéfinie qui représente le temps maximal pendant lequel il peut transmettre du trafic synchrone chaque fois qu'il reçoit le jeton. Le temps maximal que peut mettre le jeton pour faire un tour de l'anneau est un paramètre du réseau appelé TTRT (Target Token Rotation Time) fixé au démarrage du réseau. A chaque fois qu'un site reçoit le jeton, il peut émettre, pendant un temps  $H_i = \alpha_i TTRT$  ( $0 < \alpha_i < 100\%$ ), des trames synchrones. Les trames asynchrones ne peuvent être envoyées que lorsque le site reçoit le jeton en avance. Pour plus de détails sur la notion d'arrivée du jeton en avance et en retard, le lecteur intéressé trouvera les explications dans les références suivantes [47] [13].

**Protocole TTP :** Le protocole TTP pour Time Triggered Protocol [48], défini dans le cadre du système d'exploitation MARS, implémente une méthode d'accès à contrôle distribué sur un bus. Ce protocole est une implémentation très particulière du protocole TDMA (Time Division Multiple Access) classique, où chaque station possède une vue de l'horloge globale du système. Dans ce protocole, le temps global est divisé (hors ligne) en une séquence de slots, chaque slot étant pré-assigné à une station ; cette séquence définit la table de scrutation du protocole. Dans le cas le plus simple, le nombre de slots assignés dans la table de scrutation est égale au nombre de stations, et donc le temps global est équitablement partagé ; cependant, quand les besoins des stations ne sont pas identiques, un nombre différent de slots sera assigné

à chaque station dans la table de scrutation. Toutes les stations, connaissent la table de scrutation et ayant une référence temporelle commune, savent quand elles peuvent utiliser le réseau (évidemment, par le principe même, un slot est perdu s'il n'ya pas de messages à transmettre).

## **I.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la mise en évidence des caractéristiques temporelles des applications temps réel. En particulier, nous avons accordé un grand intérêt aux systèmes distribués temps réel où les échanges de données caractérisés par des contraintes temps réel, doivent être respectés par le réseau. Des solutions telles que Profibus, Interbus ou FIPWare par exemple, sont disponibles. Ces réseaux temps réel (industriels) sont essentiellement basés sur l'association d'une technologie filaire et d'une méthode d'accès au médium déterministe.

Toutefois, le développement des technologies de réseaux sans fil permet d'envisager leur utilisation dans les situations où elles apportent des avantages en termes de mobilité et de réduction des coûts de câblage. C'est le cas dans les applications temps réel engageant des entités mobiles dans lesquelles le câblage pose des contraintes d'installation et limite la liberté d'action des mobiles. C'est aussi le cas lorsque des applications sont implantées en milieu à risque pour les hommes ou pour l'environnement. Ces technologies permettent aussi d'envisager de nouvelles applications telles qu'en maintenance dans lesquelles l'opérateur mobile pourra disposer de l'information au bon endroit et au bon moment. Les réseaux de communication sans fil, seront présentés dans le chapitre II et une analyse sera menée sur leurs aptitudes à supporter le transport d'un trafic contraint temporellement.

# Chapitre 2

---

## Réseaux sans fil pour les systèmes distribués temps réel

---

### II.1. Introduction

De nos jours, les réseaux de télécommunications sont présents dans de très nombreux domaines (la production, l'espace ou la domotique). Le multiplexage des données sur un bus unique permet de limiter considérablement les câbles, abaissant globalement les coûts, tant à l'installation qu'à la maintenance. Les câbles sont généralement inesthétiques, coûteux, difficiles à installer et peu pratiques à l'usage. De plus, dans des domaines industriels où l'appareil est soumis à des contraintes vibratoires très importantes, leur connectique représente une faiblesse qui augmente considérablement le risque de panne. Dans cette démarche de forte limitation des câbles, le sans fil permet d'aller encore plus loin que le bus de données.

Les réseaux sans fil trouvent leurs applications dans des domaines très variés du monde du grand public et militaire. Ces réseaux peuvent être aussi envisagés pour les applications de l'automatique (robotique mobile, téléopération, ...) (section II.2). Les technologies de réseaux sans fil sont nombreuses et présentent des caractéristiques intéressantes (section II.3). Néanmoins leurs utilisations amènent des contraintes en défaveur des attentes des applications qui exigent des garanties de qualité de service (section II.4).

## **II.2. Motivations et Objectifs**

Jusqu'au début des années 1990, aucun type de réseau public n'était en mesure de proposer des solutions sans fil pour acheminer de la voix ou des données. Les premières réussites sont à mettre au crédit de la téléphonie qui la première proposa des téléphones dotés de combinés sans fil. Bien que ne disposant que d'une faible autonomie et d'une faible portée de communication, ces téléphones préfiguraient ce besoin de communication et cette envie de pouvoir communiquer de n'importe où. Ils ont également eu le mérite d'habituer les gens à se passer de prises murales.

La véritable explosion des réseaux sans fil pour les réseaux de données a eu lieu à la fin des années 90 et au début des années 2000 grâce à des solutions comme 802.11a ou 802.11b/g qui offrent des débits et une qualité de services se rapprochant de plus en plus des réseaux filaires traditionnels. 802.11a et 802.11g proposent par exemple des débits de l'ordre de 54 Mbit/s et 802.11b des débits de l'ordre de 11 Mbit/s. L'évolution de la spécification de l'IEEE 802.11 vers la norme 802.11n, permet des débits pouvant atteindre plus de 500 Mbit/s. Grâce à ces débits élevés et profitant de l'explosion de l'internet, ces réseaux sans fil se sont imposés comme une solution viable pour les réseaux d'accès dans les entreprises et les universités et même plus récemment chez les particuliers.

Le succès rencontré par l'utilisation des technologies des réseaux sans fil dans de nombreux secteurs du monde public et militaire, a orienté la réflexion des deux communautés professionnelle et de recherche [70] à étudier la possibilité de les intégrer dans le domaine de l'automatique où les applications sont caractérisées par de fortes contraintes temporelles et par conséquent le respect de ces exigences de temps réel et un aspect fondamental à garantir. En effet, les applications du domaine de l'automatique sont nombreuses et variables selon le contexte d'utilisation. A ce titre, nous trouvons dans le domaine de l'automobile [74] et de l'avionique [71][72][73] des applications de contrôle de vitesse et d'accélération, de synchronisation entre les moteurs et de pilotage automatique. Particulièrement dans un aéronef, les câbles posent des contraintes de lourdeur qu'il faut absolument réduire voire éliminer complètement [56]. Dans le secteur industriel, nous pouvons citer deux types d'applications essentiels. Le premier, c'est les applications de contrôle-commande du processus de production [15][75] et le deuxième concerne

toutes applications de surveillance, de diagnostic et de maintenance assistées par ordinateur [76][77][78]. La maintenance dans le secteur industriel est considérée comme le pilier central qui conditionne l'efficacité du système de production et la réussite de l'entreprise à proposer des produits qui sont en mesure de concurrencer les offres du marché local et international. La maintenance a évolué de la maintenance traditionnelle vers la e-maintenance en passant par la télémaintenance. La e-maintenance ou la maintenance collaborative est un concept lié au principe de web-services, de coopération et de partage des connaissances. Elle permet à plusieurs intervenants de n'importe où de prendre des décisions collaboratives afin de garantir une fiabilité accrue des équipements et des temps de maintenance relativement réduits [78]. Dans ce contexte, un projet européen Dynamite (Dynamic Decisions in Maintenance) a été lancé dont l'objectif est de permettre le développement des solutions sans fil dans des applications de e-maintenance [79].

Nous pouvons rajouter aussi deux autres domaines de l'automatique où une solution sans fil est devenue incontournable de nos jours, le domaine de la téléopération [80][81] et de la robotique mobile [82]. Comme pour la e-maintenance, la téléopération permet à des spécialistes du domaine de la médecine de collaborer, d'effectuer une chirurgie à distance et de pouvoir faire le suivi de leurs malades. La robotique mobile est un autre domaine qui fait appel à plusieurs compétences dans différentes disciplines, notamment celles de l'automatique et de l'informatique. Les robots mobiles pénètrent de plus en plus notre vie quotidienne, nous les trouvons à domicile pour assister les personnes âgées, ils sont déployés de plus en plus dans l'industrie, ils sont envoyés dans l'espace pour renvoyer des signaux pour toutes recherches en astronomie et actuellement ils sont considérés comme des assistants aux spécialistes de la médecine.

A travers ces exemples, nous voulons donner une nouvelle orientation quant à l'utilisation des réseaux sans fil dans le domaine de l'automatique où des technologies de communication propriétaires sont imposées depuis très longtemps et continuent jusqu'aux jours d'aujourd'hui à constituer le support de communication le plus utilisé, notamment en milieu industriel. Ces réseaux (industriels) reposent sur plus d'une cinquantaine de spécifications qu'il faut absolument faire coexister pour assurer le bon fonctionnement des applications de l'automatique (applications contrôle-commande industrielles). A titre d'exemple, selon la visite que j'ai effectuée

au sein du complexe Agro-Industrie Cevital Béjaïa, Dans les systèmes de contrôle/commande, sont déployées au moins 04 technologies différentes pour permettre le suivi et la supervision de leurs processus de production. Ces technologies, peuvent se résumer essentiellement au bus CAN, interbus, Profibus, World FIP, bitbus, Modbus et MAP (la référence [83] contient une description exhaustive des technologies de réseaux industriels). Elles sont basées sur l'association d'un support de communication filaire et des méthodes d'accès au médium déterministe garantissant ainsi les attributs temps réel pour les applications sous-jacentes.

Cependant, l'hétérogénéité et la rigidité de conception de ces réseaux conduisent à des prix exorbitant de mise en œuvre et de maintenance, empêchant toute flexibilité, évolutivité du réseau, et même de leurs permettre une connectivité au réseau de l'entreprise ou encore au réseau internet. De ce fait un dirigeant d'une entreprise ne pourra jamais consulter directement et en temps réel l'état de la production à partir de son bureau ou à domicile. De même ces réseaux ne pourront jamais bénéficier des services qui sont offerts et disponibles sur internet. Dans certaines situations, ces réseaux sont inenvisageables voire inutiles, précisément lorsque les entités intervenantes dans l'application réclament des besoins en terme de mobilité, de flexibilité et de connectivité à internet. Encore ces technologies sont complètement à écarter lorsque leurs installations posent des risques pour les hommes ou pour l'environnement.

Un autre inconvénient de ces réseaux temps réel propriétaires est celui lié aux débits et à la largeur de la bande passante qu'ils proposent. En effet, malgré que ces réseaux permettent des délais d'acheminement relativement courts mais n'autorisent dans les meilleures des cas que quelques dizaines à quelques centaines de kilos octets par secondes. Autrement dit, certaines de ces technologies ne sont faites que pour transmettre des valeurs analogiques de courant entre 4 – 20 mA qui seront interprétées par les récepteurs. Ces valeurs peuvent correspondent à des degrés de température ou à des niveaux de pression par exemple. La bande passante réduite et les débits relativement très faibles de ces technologies de transmission temps réel, constituent une faille majeure et un obstacle infranchissable quant à leurs utilisations dans un contexte nécessitant des besoins en termes de volume de données à

transmettre (cas de robots équipés d'une caméra par exemple pour renvoyer des images et/ou des vidéos).

Dans l'optique de réduction des coûts de câblages, de déploiement facile d'un réseau flexible, évolutif, aisément maintenable, permettant la mobilité, utilisant une technologie unique pour faire communiquer des équipements hétérogènes et faisant cohabiter des applications réclamant des exigences différentes en termes de qualité de service est né le besoin d'étudier la possibilité d'intégrer les technologies de communication du mode sans fil pour les applications du domaine de l'automatique. S'il est vrai que des réseaux sont d'orès et déjà employés essentiellement en milieu industriel, ceux-ci ne le sont que pour des applications peu critiques comme la surveillance ou la e-maintenance. L'utilisation de réseaux sans fil pour des applications plus sensibles aux délais d'acheminement, à la variation de ces délais (gigue) et au taux de perte de messages, nécessite une étude plus approfondie des méthodes de communications sans fil.

Dans ce projet de magister, nous aimerions explorer la piste qui consiste à étudier la faisabilité de déploiement des technologies de communication sans fil pour des applications distribuées temps réel issues du monde de l'automatique. Ces applications présentent à la fois un caractère de fortes contraintes temporelles (Contraintes de Temps Réel **Critiques**, **Strictes** ou encore **Dures**) et réclament des besoins en termes de **mobilité**, de **flexibilité** et d'**évolutivité**. Les technologies de communication sans fil sont nombreuses et généralement une classification de ces normes est donnée selon un critère de portée de communication (voir section II.3.1). Nous accentuerons dans ce projet de magister nos travaux sur les normes des réseaux locaux sans fil. Précisément la norme américaine IEEE 802.11 constituera notre centre d'intérêt.

Les technologies des réseaux WLAN présentent des caractéristiques et spécificités indéniables en termes de débit, de portée de communication et de qualité de service. Une large gamme d'applications existe et déjà déployée efficacement au dessus de ces technologies sans fil. Il existe deux standards de réseaux sans fil ; l'IEEE 802.11 de l'institut Américain d'ingénierie de l'électricité et de l'électronique, et l'ETSI HiperLAN-1 et son remplaçant HiperLAN-2 de l'institut Européen de Standardisation des Télécommunications. Bien que les normes ETSI HiperLAN-1 et HiperLAN-2 proposent des techniques d'accès très intéressantes et une variété de

couches physiques (d'ailleurs plusieurs de leurs mécanismes ont été repris et implémentés dans le standard Américain IEEE 802.11), ces deux standards n'ont vécu aucune existence et sont restés toujours au staff du laboratoire ; on disait que ces standards ont été bien avancés par rapport à leurs époques et par conséquent n'ont reçu aucun soutien financier et par la suite ils étaient abandonnés. Les seules technologies des réseaux locaux sans fil qui ont vu le jour sont celles de la spécification IEEE 802.11. Cette norme est déclinable aujourd'hui en plusieurs versions chacune répondant à des besoins divergents. Nous pouvons citer à titre d'exemple le débit, la portée de communication, la sécurité ou encore la qualité de service.

Ce projet de magister a été lancé dans l'objectif d'apporter une contribution dans la spécification de la norme IEEE 802.11 pour répondre à un besoin de garantie d'un temps d'accès borné aux messages contraints temporellement. Ces messages sont générés par l'application temps réel et le respect de leurs échéances révèle de la cohérence globale de l'application. Quant aux messages ne présentant aucune spécificité temporelle, un meilleur effort doit être fourni afin d'assurer des temps de réponses moyens globalement acceptables. La démarche adoptée, consistera à identifier les imperfections des normes des réseaux locaux sans fil (particulièrement IEEE 802.11) par rapport aux contraintes temporelles et de combler ces lacunes par des adaptations protocolaires valides sur le plan temporel.

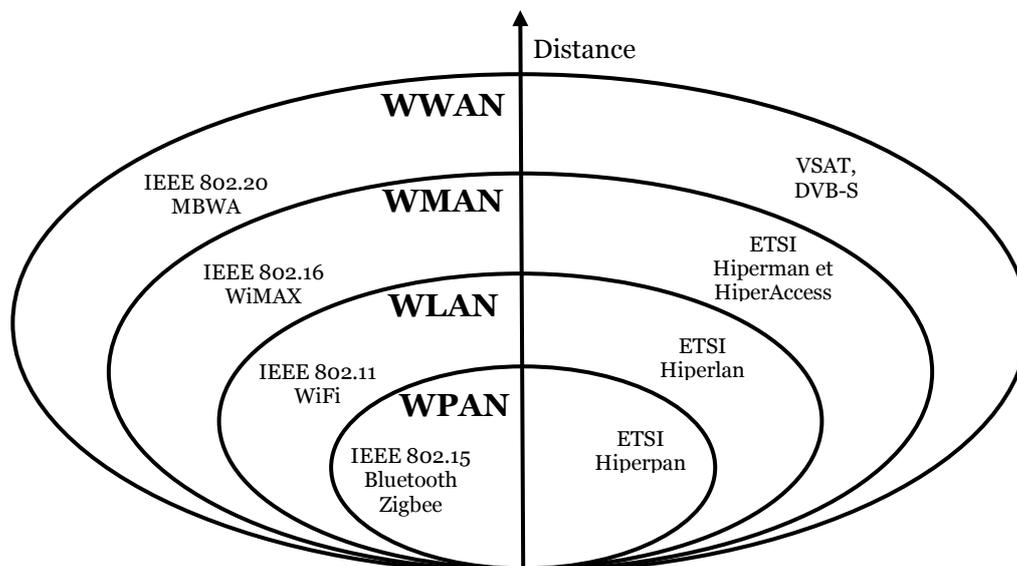
## **II.3. Présentation des réseaux sans fil**

Dans cette section, nous allons donner une vue d'ensemble des réseaux de communication sans fil. Une classification suivant la portée de communication des différentes technologies ainsi que les différents modes de fonctionnement seront présentés.

### **II.3.1. Classification des réseaux sans fil**

De nos jours, nous avons à notre disposition de nombreuses technologies sans fil standardisées. La technologie parfaite n'existe pas et chacune d'entre elles représente un compromis entre différents facteurs tels que le débit, la portée, les contraintes temporelle... etc. Nous parlerons alors de différents types de réseaux sans

fil. Les applications vont souvent varier d'un type de réseaux à l'autre c'est pourquoi chaque type de réseau repose sur des normes de communication différentes.



**Figure II. 1:** Classification des réseaux sans fil selon la portée.

En tenant compte de la portée de ces technologies, nous distinguons quatre types différents de réseaux sans fil (Voir Figure II.1) [68].

- Les Réseaux Personnels Sans Fil (WPAN, Wireless Personal Area Network) ;
- Les Réseaux Locaux Sans Fil (WLAN, Wireless Local Area Network) ;
- Les Réseaux Métropolitains Sans Fil (WMAN, Wireless Metropolitan Network) ;
- Les Réseaux distants (étendus) (WWAN, Wireless Wide Area Network).

### II.3.1.1. les réseaux personnels sans fil (WPAN)

Les réseaux personnels sans fil (WPAN), sont des réseaux à très faible portée (de l'ordre d'une dizaine de mètres). Ils sont le plus souvent utilisés dans le cadre du *Wearable Computing* [49] ou informatique vestimentaire qui consiste à faire communiquer entre eux des matériels présents sur une personne (par exemple une oreillette et un téléphone portable). Ils sont également utilisés pour relier des équipements informatiques entre eux (par exemple pour relier une imprimante ou un PDA à un ordinateur de bureau). Aujourd'hui, le réseau personnel sans fil le plus connu est le Bluetooth. Deux nouvelles technologies apparaissent : l'une permettant

un débit élevé (UWB), et l'autre la connexion d'équipements contraints énergétiquement (ZigBee).

### II.3.1.1.1. Bluetooth

HARALD BLATAND surnommé « *la dent bleue* » fut roi du Danemark de 940 à 981. Il a donné son nom à la technologie Bluetooth, mise au point par le Suédois Ericsson qui recherchait des alternatives au câblage pour le transport de la voix et de données d'un téléphone cellulaire à ses accessoires. Cette technologie est basée sur une hiérarchie maître/esclave qui permet de faire communiquer un appareil maître avec 7 autres appareils esclaves formant ainsi un piconet [50]. Elle est principalement prévue pour remplacer les câbles qui relient les appareils et périphériques entre eux. Il est possible de constituer dans un même rayon d'action un maximum de 10 piconets (soit 80 appareils en théorie) formant alors un scatternet [51] (Voir Figure II.2). Bluetooth est aujourd'hui standardisé sous le nom IEEE 802.15.1 [52]. Dans sa version 2.1 [53] validée par le Bluetooth SIG (*Special Interest Group*), consortium en charge de l'interopérabilité des équipements, il permet de bénéficier des débits allant jusqu'à 2 Mbit/s en utilisant le mode EDR (*Enhanced Data Rate*) dans un rayon de moins de 100 mètres. Il utilise la bande de fréquence des 2,4 GHz également utilisée par le Wi-Fi. Cette bande de fréquence ne nécessite pas de licence.

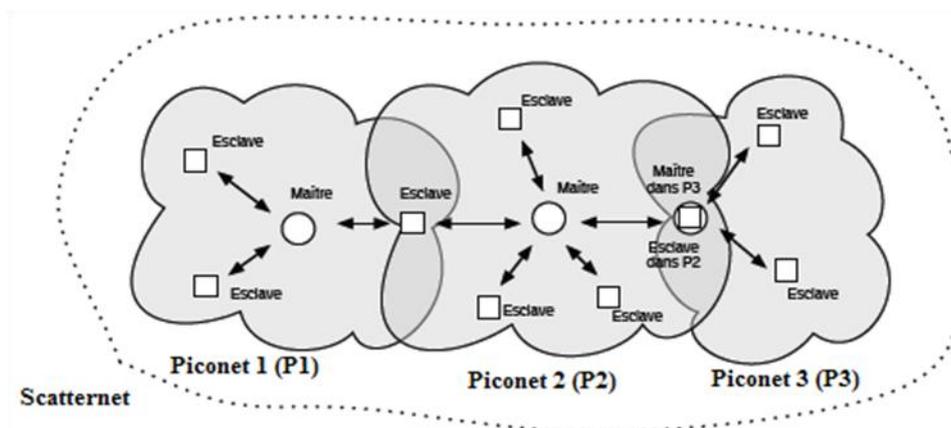


Figure II. 2 : Un scatternet Bluetooth.

### II.3.1.1.2. Ultra Wide Band (UWB)

L'Ultra Wide Band utilise une très grande bande de fréquence pour transmettre des données. Le signal ainsi émis pour chaque bande de fréquence est donc très peu puissant et ne perturbe pas les autres signaux (Bluetooth, Wi-Fi, etc.).

L'UWB répond au standard IEEE 802.15.3 [54] et permet de transmettre plusieurs centaines de Mbit/s sur quelques dizaines de mètres. Cependant cette bande de fréquence large impose une restriction sur la portée qui, dès lors qu'elle devient plus grande, diminue d'une manière accrue la puissance du signal reçu et vient faire chuter les débits. L'UWB possède d'autres avantages, par exemple au niveau de la propagation entraîne une bonne résistance aux phénomènes de multi-trajets [67]. Malgré les promesses de l'UWB, très peu de produits répondant aux spécifications strictes de 802.15.3 sont disponibles à ce jour.

### **II.3.1.1.3. ZigBee**

ZigBee est une norme pour des communications bas débit et dédiées à des applications embarquées. Un émetteur/récepteur ZigBee est caractérisé par une portée de quelques dizaines de mètres et un débit de 20 à 250 kbit/s. La norme prévoit l'utilisation de trois bandes de fréquence (868, 915 ou 2400 MHz). La spécification ZigBee propose une pile protocolaire propriétaire et légère, déclinable dans plusieurs versions. Elle s'appuie sur la norme IEEE 802.15.4 [55] pour les couches Physique et Liaison de données. Elle propose ses propres couches supérieures (Réseau, etc.). ZigBee réalise de fortes économies d'énergie grâce à une optimisation du regroupement des communications de manière à favoriser de larges périodes de mise en veille du matériel [56]. L'objectif en termes d'autonomie est d'atteindre deux ans avec des piles alcalines standard pour des dispositifs embarqués faiblement communicants. Depuis l'amendement 802.15.4 en 2006, plusieurs couches physiques ont été rajoutées permettant une malléabilité plus grande en termes de débit et de bandes de fréquences disponibles. Le lecteur intéressé pourra trouver la description de ces couches physiques dans [57].

### **II.3.1.1.4. RFID**

La technologie de radio-identification ou RFID (*Radio Frequency Identification*) est utilisée de prime abord pour la fabrication de radio-étiquettes EPC (*Electronic Product Code*). Cette technologie est prévue pour remplacer l'identification optique par codes barres. L'instance normative n'est pas l'ISO mais un Comité Technique Joint, JTC (*Joint Technical Comitee*). Bien que les puces RFID ne disposent que de peu de puissance de calcul, ces dernières autorisent une communication avec les objets ou les personnes à des prix extrêmement bas. Les

protocoles utilisés sont très différents des autres réseaux et dépendent fortement de l'application [58]. En effet, les puces RFID transmettent généralement seulement un simple identifiant (*tag*) à la demande du lecteur (station de base). La technologie RFID autorise une portée de quelques mètres dans le cas de puces passives et de quelques dizaines à quelques centaines de mètres pour les puces alimentées [57].

### **II.3.1.2. Les réseaux locaux sans fil (WLAN)**

Les réseaux locaux sans fil sont généralement utilisés à l'intérieur d'entreprises, d'universités mais également chez les particuliers depuis le développement des offres à haut débit. Ces réseaux sont principalement basés sur la technologie IEEE 802.11 [59] soutenue par le WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) ou sur la technologie HiperLan-1 et son remplaçant Hiperlan-2 soutenue par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Ils offrent des débits de transmission beaucoup plus élevés et des zones de couverture beaucoup plus larges que dans le cas des réseaux WPAN.

#### **II.3.1.2.1. ETSI HiperLAN**

HiperLAN est une norme de réseaux locaux sans fil mise au point par le comité RES10 (Radio Equipment and Systems) de l'ETSI. Quatre déclinaisons d'HiperLAN ont été proposées par le comité: HiperLAN/1, HiperLAN/2, HiperACCESS et HiperLINK. Dans ce qui suit, nous allons décrire les deux versions : HiperLAN /1 et HiperLAN/2. Car celles-ci présentent des caractéristiques intéressantes dans le cadre de notre travail.

***ETSI HiperLAN/1:*** est le premier projet d'HiperLAN lancé en 1991. Il s'agit d'une norme complète qui propose une couche physique, une méthode d'accès et un protocole de routage pour élaborer des réseaux ad hoc maillés et spontanés. Cette technologie opère sur la bande des 5,1 GHz - 5,3 GHz et propose un débit bande de base de 23,5 Mbits/s, sur une portée de 50 mètres environ. Les modulations utilisées sont de type FSK et GMSK. La méthode d'accès au médium proposée par l'ETSI pour HiperLAN/1 est le EY-NPMA (Elimination Yield - Non-preemptive Priority Multiple Access). Cette technique d'accès au médium permet d'introduire des niveaux de priorités pour favoriser certaines stations ou flux de données par rapport aux autres. Le fonctionnement de cette technique sera décrit en détail dans le chapitre III. En 1996, les concepteurs de cette norme étaient certainement trop en avance sur leur

temps et leur proposition d'avant-garde n'a pas reçu de soutien économique. Elle a rapidement été abandonnée au profit d'HiperLAN/2.

**ETSI HiperLAN/2:** a été ratifiée en février 2000. Cette seconde version est radicalement différente de la première : mode infrastructure, transport natif d'ATM et UMTS, plusieurs couches physiques pour s'adapter à l'environnement électromagnétique. HiperLAN/2 a été la première technologie à mettre en œuvre la technique d'étalement de spectre OFDM. Elle propose plusieurs modulations (BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM) pour plusieurs débits (6, 9, 12, 18, 27, 36 et 54 Mbits/s) sur la bande des 5,4 GHz - 5,7 GHz. La couche physique d'HiperLAN/2 a ensuite été reprise par 802.11a, puis 802.11g, ce qui explique les similarités des fréquences et des débits en bande de base entre HiperLAN/2 et 802.11a/g. HiperLAN/2 est intimement liée à ATM qui était prévu pour être le protocole de niveau réseau/transport au dessus d'HiperLAN/2. Outre le transport des cellules ATM, HiperLAN/2 peut aussi véhiculer nativement des données vidéo MPEG, des paquets IP, ainsi que la voix numérisée des téléphones cellulaires UMTS. Elle prévoit également une gestion de la mobilité pour des vitesses inférieures à 10 m/s par *handover* (changement de cellule) et propose une gestion de Qualité de Service par des communications établies en mode connecté. A l'opposé d'HiperLAN/1 qui est basé sur une topologie de réseau ad hoc, HiperLAN/2 propose un réseau sans fil avec infrastructure. Les informations échangées passent par un ou plusieurs points d'accès (AP, Access Points) qui gèrent l'accès au médium selon le principe du TDMA dynamique (Cette technique d'accès sera détaillée dans le chapitre III). Malheureusement pour lui, le RES10 n'a pas reçu autant de soutien que le groupe IEEE 802.11, son concurrent direct. La commercialisation d'équipements au standard HiperLAN/2 a été très limitée et le projet est abandonné aujourd'hui.

### **II.3.1.2.2. IEEE 802.11**

L'IEEE 802.11 est le standard des réseaux locaux sans fil proposé par l'organisme de standardisation Américain IEEE. Il est généralement considéré comme la version sans fil de l'IEEE 802.3 (Ethernet). La norme originale a été ratifiée en 1997. Elle a depuis été largement amendée par de nombreux groupes de travail. Aujourd'hui, l'IEEE 802.11 est la norme de réseaux locaux sans fil la plus utilisée à travers le monde, du fait de sa grande simplicité, de son faible coût de mise en œuvre et aussi grâce aux soutiens techniques et financiers dont elle a bénéficié.

Dans sa version initiale de 1997, 802.11 proposait trois couches physiques :

- Radio, à étalement de spectre par utilisation de séquences directes (DSSS), débit bande de base 1 Mbits/s et 2 Mbits/s ;
- Radio, à étalement de spectre par utilisation de sauts de fréquences (FHSS), à 1,6 Mbits/s ;
- Infrarouge, 1 ou 2 Mbits/s.

A l'heure actuelle, seule la couche physique radio à étalement de spectre par séquences directes (DSSS) perdure. Les deux autres (Radio FHSS et infrarouge), bien qu'ayant été implémentées et commercialisées à la fin des années 90, n'ont pas survécu. Depuis, les techniques ont été fortement améliorées et les dernières couches physiques basées sur le principe du MIMO permettent d'obtenir des débits de plusieurs centaines de Mbits/s.

Le standard 802.11 a été amendé par de nombreux groupes de travail. Chaque groupe de travail fait des propositions qui donnent lieu à des améliorations de la norme. Elles sont répertoriées dans [56]:

**802.11a** : propose huit canaux dans la bande des 5 GHz. Cette proposition permet d'atteindre un débit bande de base de 54 Mbits/s sur une portée d'une vingtaine de mètres environ par utilisation du principe de l'OFDM.

**802.11b** : propose une amélioration de la norme initiale en introduisant la modulation CCK dans la bande des 2,4 GHz. Deux nouveaux débits sont alors disponibles : 5,5 Mbits/s et 11 Mbits/s sur une portée de quelques dizaines de mètres environ. Ratifiée en septembre 1999, 802.11b est l'amendement de 802.11 qui a donné sa popularité au Wi-Fi. Bien que 802.11b soit encore largement utilisé, il est maintenant supplanté par 802.11g.

**802.11c** : propose une modification de la norme 802.1d existante pour les réseaux filaires afin de la transposer à 802.11. Elle permet une normalisation de l'interconnexion de niveau 2 (pont) entre un réseau filaire et un réseau Wi-Fi.

**802.11d** : propose un protocole d'échange d'informations sur les fréquences et les puissances d'émission en vue d'une utilisation dans chaque région du monde, quelque soit le pays d'origine du matériel.

**802.11e** : propose des outils de Qualité de Service. Les travaux spécifiques de ce groupe de travail seront détaillés dans le chapitre III.

**802.11f** : est une recommandation qui propose une extension pour la communication entre points d'accès compatibles 802.11 par le protocole IAPP (Inter-Access Point Protocol ) en introduisant des capacités de changement de cellules et d'équilibrage des charges (load-balancing).

**802.11g** : constitue une amélioration directe de 802.11b en proposant un débit bande de base de 54 Mbits/s sur la bande des 2,4 GHz. Ce gain en débit est réalisé en reprenant le concept de l'étalement de spectre par OFDM utilisé dans 802.11a. Toutefois, 802.11g garde une compatibilité avec 802.11b, ce qui signifie que des matériels conformes à la norme 802.11g peuvent fonctionner en 802.11b.

**802.11h** : propose des améliorations pour pallier au futur problème de la sur-utilisation des fréquences dédiées à 802.11. Ce groupe de travail propose d'une part une possibilité de sélection dynamique de fréquence appelée DFS pour Dynamic Frequency Selection, qui permet de choisir le canal le moins perturbé, et d'autre part le contrôle de puissance TPC pour Transmit Power Control, qui permet à l'émetteur de réduire sa puissance d'émission au minimum nécessaire.

**802.11i** : est la norme qui spécifie la solution de chiffrement désignée communément par le label WPA2. Elle s'appuie sur TKIP et AES et, contrairement à WPA, permet aussi bien la sécurisation des réseaux en mode infrastructure comme en mode ad hoc. Deux déclinaisons sont possibles : le WPA personnel qui repose sur la connaissance d'une clé commune (comme le WEP, mais qui peut être de longueur variable, contrairement à ce dernier) et le WPA entreprise qui repose sur 802.1x avec un serveur d'authentification, par exemple de type RADIUS.

**802.11IR** : normalise une couche physique de type infrarouge pour 802.11. Elle utilise des signaux optiques de la bande des 800-900 nm et propose deux modulations de type PPM (Pulse Position Modulation) : 16-PPM qui permet d'atteindre un débit de 1 Mbits/s et 4-PPM pour 2 Mbits/s. Au départ soutenu pour ses vertus de sécurité (les signaux infrarouges ne traversent pas les cloisons) elle a rapidement été abandonnée au profit de 802.11a et 802.11b qui présentent des débits plus importants.

**802.11j** : propose une couche physique spécifique pour satisfaire à la réglementation japonaise. Très proche de 802.11a (OFDM, 54 Mbits/s, etc.), elle travaille dans la bande 4,9 GHz – 5 GHz.

**802.11n** : propose un débit bande de base de 540 Mbits/s sur une portée de 50 mètres environ grâce à l'utilisation conjointe des techniques MIMO et OFDM. Elle propose l'utilisation des deux bandes de fréquences 2,4 GHz (comme 802.11b et 802.11g) et 5 GHz (comme 802.11a). Comme 802.11g, cette norme reste compatible avec 802.11 ; de plus, elle reprend les concepts de 802.11e pour la gestion de la Qualité de Service, de 802.11i pour la sécurité et de 802.11f pour la gestion des handovers. Cette norme a été ratifiée le 11 septembre 2009.

**802.11s** : propose une extension à la méthode d'accès au médium de 802.11 ainsi qu'une méthode de routage pour les réseaux ad hoc de type Mesh (réseaux ad hoc maillés). La diffusion des routes est assurée par une méthode d'inondation et un algorithme très proche d'OLSR.

**802.11r** : propose d'introduire des fonctionnalités supplémentaires pour permettre le saut de cellule rapide d'un BSS à l'autre. Il devrait permettre aux terminaux mobiles de passer d'une cellule à une autre sans perte d'accès au réseau.

Même si la norme originale IEEE 802.11 a subi plusieurs amendements, néanmoins les principes de base restent les mêmes particulièrement sur les techniques d'accès proposées par ce standard. Ces techniques sont basées sur le protocole CSMA/CA utilisé en mode ad hoc ou sur le protocole Polling utilisé en mode infrastructure. Les méthodes d'accès des réseaux WLAN IEEE 802.11 seront profondément étudiées dans le chapitre III.

### **II.3.1.3. les réseaux métropolitains sans fil (WMAN)**

Les réseaux métropolitains ont pour objectif de créer un ensemble de liens de communication sur une zone étendue de la taille d'une ville ou d'une région. Ces liens peuvent servir à interconnecter plusieurs sites d'une même entreprise ou d'une administration. Nous pouvons distinguer trois grandes familles des réseaux WMAN :

### II.3.1.3.1. WiMAX

WiMAX est le consortium qui est chargé de la promotion des technologies de réseaux sans fil métropolitains IEEE 802.16 [60] et ETSI HiperMAN [61] [62]. Il prône la convergence de ces deux standards pour une technologie unique et interopérable. A ce titre, le consortium WiMAX a créé le label « *WiMAX* » qui certifie que l'équipement labellisé est approuvé selon les critères définis par le consortium et qu'il est compatible avec les autres équipements labellisés, quelque soit le fabricant du matériel. De part leurs concepteurs communs, les normes HiperMAN et 802.16 sont très semblables :

**HiperMAN** : est une norme proposée par le comité européen de standardisation des télécommunications (ETSI) [63], qui a pour objectif de proposer une normalisation des réseaux sans fil métropolitains, essentiellement pour raccorder les PME (Petites et Moyennes Entreprises) et les particuliers à un réseau haut débit. HiperMAN propose d'utiliser la bande des 2 à 11 GHz et prévoit des mécanismes d'adaptation automatique de la puissance d'émission, de la modulation et du codage pour fiabiliser la transmission dans les conditions les plus difficiles, permettant ainsi d'envisager des liens de transmission entre deux stations qui ne sont pas à vue comme un terminal dans un bâtiment. Le standard propose également un multiplexage optimisé à base de TDD (Time Division Duplexing) et de FDD (frequency Division Duplexing) [56]. La technologie permet le transport natif de paquets IP ou de cellules ATM pour des applications multimédia (voix, vidéo, téléphonie).

**IEEE 802.16** : propose lui aussi un standard pour les réseaux sans fil métropolitains haut débits. Comme tous les autres standards issus du comité de standardisation 802 [64] de l'organisme de standardisation américain IEEE, ce standard est le résultat d'un travail mené par le groupe de discussion (Tasking Group) désigné par « *TG16* ». Il spécifie les couches physiques et liaison de données et propose un débit bande de base de 70 Mbits/s sur un rayon d'une dizaine de kilomètres. Plusieurs bandes de fréquences sont proposées (2,5 à 3,5 GHz, 10 à 66 GHz) ainsi que plusieurs modulations basées sur le principe de l'OFDM qui consiste à répartir plusieurs flux de données sur autant de sous-porteuses. Comme les données sont émises en bande étroite, elles sont moins sujettes à la variabilité des caractéristiques du médium radio, en particulier pour des transmissions présentant des échos importants (multi-trajets).

### II.3.1.3.2. Réseaux mobiles de 3<sup>ème</sup> génération (3G)

L'objectif des réseaux de téléphonie 3G est de permettre l'utilisation du réseau en situation de grande mobilité. Les réseaux 3G sont avant tout des réseaux nationaux d'opérateurs et nécessitent la mise en œuvre d'équipements lourds et coûteux sur chaque site concerné. La troisième génération de téléphones mobiles succède à la deuxième génération basée sur les technologies GSM (Europe) et CDMA (Etats-Unis) qui elle-même avait remplacé les premières générations analogiques basées sur Radiocom2000 en France. Bien que l'arrivée du transport de données avec l'évolution du GPRS (surnommé 2,5G) ait permis quelques améliorations, les réseaux mobiles 3G intègrent à la fois le transport des données et de la voix. Nous pouvons distinguer plusieurs normes de réseaux 3G [57]:

**EDGE** : Parfois nommée 2,75G est une évolution du GPRS. Plutôt que d'augmenter le débit en se contentant d'ajouter les canaux de transmission, EDGE utilise une modulation 8-PSK. Il autorise des débits jusqu'à 474 kbit/s et permet de conserver la compatibilité GSM/GPRS en utilisant les mêmes bandes de fréquence (890-915 MHz et 935-960 MHz) [57].

**UMTS** : Suivi par le consortium 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), permet un débit théorique jusqu'à 2 Mbit/s. Il existe deux grands types d'UMTS, suivant l'interface radio utilisée : le TD-CDMA ou le W-CDMA. Il utilise dans sa version européenne (W-CDMA) des canaux de 5 MHz dans les bandes 1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz [69][57].

**CDMA-2000** : Suivi par le consortium 3GPP. Il est légèrement différent du W-CDMA de l'UMTS, il permet également un débit théorique allant jusqu'à 2 Mbit/s dans sa version initiale (canaux de 1,25 MHz). Les évolutions récentes telles que le CDMA-2000-EV-DO (*Evolution Data Optimized*) autorisent un débit allant jusqu'à 3,1 Mbit/s [57].

**HSDPA** : Surnommée 3,5G (ou 3G+) est une évolution de l'UMTS. HSDPA est définie par la version 5 du W-CDMA du consortium 3GPP. Elle autorise des débits jusqu'à 14,4 Mbit/s et cumule l'avantage de ne nécessiter que peu de transformations par rapport à l'UMTS en introduisant un mécanisme de répétition hybride (HARQ) et en modifiant les fonctions des stations de base [57].

### **II.3.1.3.3. MBWA**

Le comité de standardisation 802 (LAN/WAN) de l'IEEE compte un groupe de discussion sur les réseaux d'accès sans fil large bande et mobiles (Mobile Broadband Wireless Access, MBWA), le TG20. L'objectif de ce groupe de discussion est l'élaboration d'un standard pour une couche physique et une couche liaison de données, pour un réseau mobile sans fil haut débit orienté paquets, en vue d'un interfaçage direct avec IP. Les objectifs du TG20 sont assez semblables à ceux du TG16e (Mobile WiMAX). Les principales caractéristiques du réseau MWBA sont les suivantes :

- Mobilité des nœuds jusqu'à 250 km/h ;
- Débit 1 Mbits/s (au niveau IP) ;
- Couche physique utilisant la bande des 3,5 GHz, soumise à licence ;
- Mode paquets, itinérance de niveau IP (*IP roaming & handoff*).

Cette norme promet quelques ambitieuses avancées dans le domaine des réseaux mobiles haut débit ; ces dernières demandent cependant à être vérifiées expérimentalement [57].

### **II.3.1.4. Les réseaux étendus (WWAN)**

Les seules technologies de WWAN disponibles sont des technologies utilisant les satellites géostationnaires ou en orbite basse pour relayer l'information entre plusieurs points du globe. Il existe plusieurs standards de réseaux utilisant les satellites comme VSAT [65] (utilisés pour la transmission de transactions bancaires) ou DVB-S [66] (norme grand public pour les diffusions de télévision, radio et service de données par satellite). Nous ne détaillerons pas plus longuement ces techniques qui dépassent le champ de la thématique étudiée.

### **II.3.2. Modes de fonctionnement des réseaux sans fil**

Les réseaux sans fil sont conçus pour fonctionner en deux modes [68]. Le premier, il s'agit bien d'un schéma centralisé où un point d'accès orchestre toutes les communications entre les nœuds du réseau. Alors que le deuxième est totalement distribué (auto-organisé), où chaque nœud joue le rôle d'un émetteur et d'un routeur. Dans ce paragraphe, nous allons donner une description de ces deux modes de fonctionnement avec quelques une de leurs spécificités.

### **II.3.2.1. Réseaux sans fil avec infrastructure**

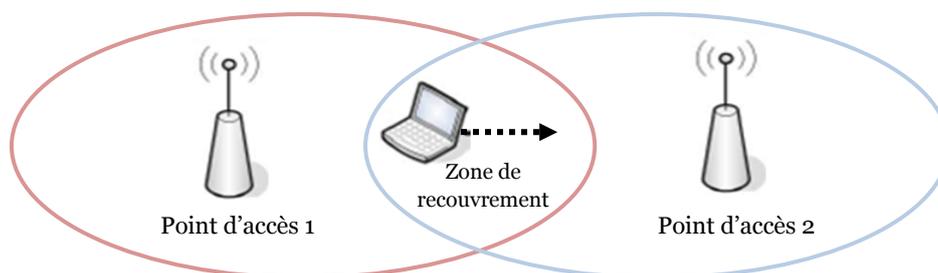
Les réseaux sans fil avec infrastructure sont également appelés réseaux cellulaires. Ces réseaux se composent de deux types de terminaux : les stations de base ou points d'accès et les terminaux mobiles ou nœuds mobiles. Les points d'accès sont des terminaux fixes reliés en général à une source d'énergie illimitée et chargés de relayer les informations qui circulent dans leur cellule. Ils jouent le rôle de serveur pour chaque terminal mobile présent dans la cellule. Les terminaux mobiles se déplacent librement mais ne communiquent jamais directement les uns avec les autres. Toutes les communications se font systématiquement vers le point d'accès le plus proche qui se charge ensuite de les relayer à la destination. Ces réseaux sont donc une réponse au problème d'affaiblissement du signal. En effet, en déployant plusieurs points d'accès, on peut étendre la couverture globale du réseau. Tous les points d'accès sont reliés entre eux par un réseau filaire qui se charge de la partie routage ainsi que de la plupart des fonctions d'administration (authentification centralisée par exemple). Ce type de réseau est de plus en plus utilisé dans les entreprises et les universités comme dernier bond d'un réseau d'accès à l'Internet.

Les réseaux sans fil avec infrastructure sont souvent retenus pour leur simplicité d'administration. En effet comme les points d'accès sont fixes et n'ont pas de problème d'énergie, la topologie du réseau demeure dans l'ensemble assez stable. De plus, les problèmes de routage sont ici réduits à leur plus simple expression dans la mesure où toutes les communications (sur la partie sans fil) se font en un saut. Il existe cependant des problèmes ouverts auxquels s'intéressent de nombreux travaux de recherche. Parmi eux nous pouvons citer celui du changement de réseau aussi appelé *handover* ou *handoff*.

Le changement de réseau peut être de deux types : horizontal lorsque l'on passe d'un point d'accès à un autre sur la même technologie, ou vertical lorsque l'on change de technologie pour améliorer la qualité de service. Seul le handover horizontal sera présenté ici. Le handover survient lorsqu'un nœud se déplace et quitte la zone de couverture d'une cellule pour entrer dans la zone de couverture de la cellule voisine (Voir Figure II.3). Le temps de réassociation entre le nœud et le nouveau point d'accès est appelé délai de handover. Lorsque le nœud atteint la zone de recouvrement des cellules, il rompt sa connexion avec le premier point d'accès et établit une nouvelle connexion avec le point d'accès de la cellule qu'il est en train

d'intégrer. Il peut également conserver sa première connexion tout en établissant la communication avec le deuxième point d'accès, on parlera dans ce cas de handover doux (soft handover). Lorsque les cellules ne sont pas dans les mêmes bandes de fréquences (pour éviter les interférences et les collisions) on parlera de handover dur (hard handover) car il doit non seulement changer de point d'accès mais également changer sa bande de fréquence d'émission voire sa modulation ; dans ce cas il ne peut pas toujours maintenir la connexion.

Lorsqu'un nœud change d'opérateur en changeant de cellule on dit alors qu'il effectue une forme particulière de handover appelée *roaming*. De plus, contrairement au handover classique qui suggère que la connexion est maintenue lors du changement de cellule, le roaming ajoute une dimension d'interruption de la communication. Un exemple simple de roaming se retrouve dans le monde de la téléphonie mobile où un client abonné chez un opérateur dans son pays d'origine va pouvoir utiliser le réseau d'un autre opérateur lors de ses déplacements à l'étranger et ceci de manière transparente.

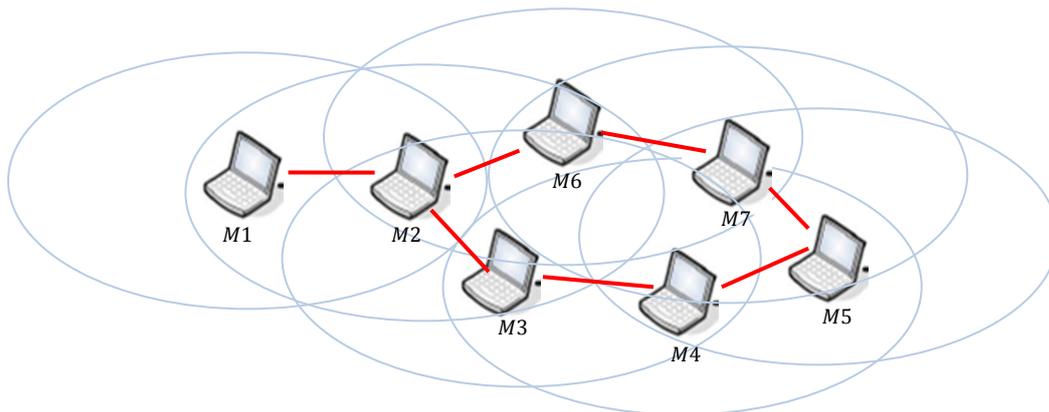


**Figure II. 3:** Exemple de handover entre deux cellules.

### II.3.2.2. Réseaux sans fil sans infrastructure (ad hoc)

Contrairement aux réseaux cellulaires qui sont organisés autour de points d'accès jouant le rôle de routeurs, les réseaux Ad-Hoc sont des réseaux distribués et spontanés se composant uniquement de terminaux mobiles. Dans ce type de réseau, présenté sur la figure II.4, chaque nœud du réseau joue à la fois le rôle d'élément terminal et le rôle de routeur pour relayer les messages de ses voisins vers un nœud qui n'est pas situé dans le voisinage immédiat. On parle alors de réseau coopératif. Sur l'exemple présenté sur la figure II.4, le nœud  $M1$  ne peut pas communiquer directement avec le nœud  $M5$ , mais il peut faire relayer son message par  $M2$ ,  $M3$  et  $M4$ .

Le groupe de travail Mobile Ad-Hoc NETworks (MANET) de l'Internet Engineering Task Force (IETF) a formalisé l'ensemble de ces caractéristiques dans le Request For Comment (RFC) numéro 2501 [84]. Du fait de la mobilité des nœuds, des problèmes de propagation et d'énergie, la topologie d'un réseau Ad-Hoc évolue beaucoup au cours du temps si bien que les routes permettant aux nœuds de communiquer ne sont pas statiques. Contrairement aux réseaux filaires, une rupture de route ne peut pas être considérée comme un événement rare dans un réseau Ad-Hoc. La fréquence de ces évolutions va dépendre principalement de la vitesse de déplacement des nœuds mais également de l'énergie dont dispose chaque nœud. En effet, comme chaque nœud doit servir de routeur à ses voisins, la disparition d'un nœud par manque d'énergie va entraîner des re-calculs de routes. Dans certains cas, cette mobilité et ces aspects énergétiques peuvent également entraîner des partitionnements du réseau. Par exemple, si les nœuds  $M3$  et  $M6$  viennent à manquer d'énergie, les nœuds  $M1$  et  $M2$  pourront plus communiquer avec  $M4$ ,  $M5$  et  $M7$ .



**Figure II. 4 :** Exemple de réseau ad hoc.

Les réseaux Ad-Hoc sont un des éléments moteurs de la recherche dans les réseaux sans fil car leurs domaines d'application sont très nombreux. Ils vont du scénario militaire où des soldats veulent échanger des informations en zone de combat, jusqu'aux interventions sur les sites de catastrophes naturelles en passant par la création spontanée d'un réseau pour des événements sociaux comme par exemple une conférence scientifique. Pour généraliser, ces réseaux vont être utiles partout où il n'y a pas d'infrastructure.

La principale difficulté rencontrée dans ces réseaux très évolutifs est le routage. En effet les réseaux Ad-Hoc sont des réseaux multi-sauts contrairement aux réseaux cellulaires. Dans ce type de réseau, lorsqu'une source cherche à

communiquer avec une destination distante de plus d'un saut, elle doit soit inonder le réseau, soit mettre en œuvre un algorithme de recherche de route avancé. La technique de routage par inondation permet certes de contacter une destination mais elle est très coûteuse en énergie et consomme également beaucoup de bande passante. L'utilisation d'un algorithme de routage (qui peut cependant utiliser l'inondation ponctuellement pour établir les routes) est le plus souvent préférée de manière à optimiser la gestion des ressources. Ce type de réseau est donc beaucoup plus sensible aux problèmes de mobilité des nœuds et aux problèmes d'énergie. Comme la topologie du réseau peut changer très rapidement, les protocoles de routage utilisés habituellement dans l'Internet ne sont pas facilement transposables. Dans les réseaux filaires, on considère en effet les déconnexions et les changements de route comme des événements rares, ce qui ne va pas être le cas pour un réseau Ad-Hoc. Pour résoudre ce problème, de nouveaux algorithmes de routage Ad-Hoc ont été proposés dont les principaux se classent en trois grandes familles : les algorithmes proactifs, les algorithmes réactifs et les algorithmes hybrides. La description de ces classes de protocoles peut être trouvée dans la référence suivante [85].

## **II.4. Problématique des réseaux sans fil**

Dans cette section, nous allons montrer les contraintes des réseaux sans fil qui empêchent la transposition des mécanismes et protocoles connus du monde filaire. Face à ce lot de contraintes, nous définirons explicitement une orientation de nos travaux dans le cadre de ce mémoire de magister.

### **II.4.1. Contraintes des réseaux sans fil**

Par nature, les communications sans fil entraînent un certain nombre de problèmes n'ayant pas d'équivalent dans le monde filaire. La propagation du signal radio est un élément clé de la qualité d'une transmission mais le nombre de fréquences et de canaux disponibles pour communiquer est limité. Ainsi, lorsque deux nœuds émettent simultanément sur des bandes de fréquences ou des canaux proches, des interférences seront ressenties sur les deux communications. De plus, la météo, la distance et l'environnement en général vont affecter la qualité d'une transmission radio en perturbant le signal. Le signal s'atténue en fonction de la

distance entre l'émetteur et le récepteur mais également en fonction de problèmes de réflexion et de chemins multiples. Ces problèmes de réflexion vont dépendre des matériaux composant les différents obstacles : l'onde sera partiellement absorbée avec du bois ou complètement bloquée avec du plomb. Les différentes réflexions de l'onde sur les obstacles vont faire apparaître des chemins multiples sur une communication générant des interférences (du bruit) au niveau du nœud récepteur. Des sources électriques et/ou électromagnétiques extérieures peuvent également agir sur une communication en brouillant le signal radio émis. Toutes ces perturbations vont déformer le signal et ceci jusqu'à le rendre inutilisable par le destinataire. Dans ce contexte, nos premiers travaux sur la norme IEEE 802.11 ont été effectués en 2008 au sein du laboratoire LAMOS (Laboratory of modeling and Optimisation of systems), en vue de montrer l'influence de l'environnement sur les performances de cette norme. Ce travail a fait l'objet de mon mémoire de fin d'études [67].

Le fait que le signal s'atténue avec la distance pose un autre problème : le signal émis par un nœud est beaucoup plus fort que n'importe quel signal reçu si bien que lorsqu'un nœud est en train d'émettre, il ne lui est pas possible d'entendre une autre communication. Le signal qu'il envoie est tellement fort qu'il va lui masquer toutes les autres transmissions qu'il pourrait recevoir. Les nœuds ne peuvent donc pas émettre et écouter en même temps si bien que nous parlerons de réseaux half-duplex contrairement aux réseaux filaires qui sont par nature full-duplex. Contrairement aux réseaux filaires où un nœud détecte une collision en comparant le message circulant sur le câble avec celui qu'il cherche à émettre, le nœud émetteur dans un réseau sans fil ne peut pas détecter les collisions qui peuvent survenir au niveau du nœud récepteur à cause de l'atténuation du signal en fonction de la distance. Enfin, la dernière conséquence de cette atténuation du signal est que les nœuds ne peuvent communiquer qu'avec des nœuds géographiquement proches (on parlera alors de nœuds voisins). Cette portée de communication va définir des cellules naturelles dans lesquelles les communications pourront avoir lieu à un saut. Une cellule sera centrée sur un nœud et englobera tous les nœuds voisins. Ainsi, deux nœuds appartiendront à la même cellule s'ils sont à portée de communication l'un de l'autre.

Les taux d'erreurs rencontrés dans un réseau sans fil sont beaucoup plus importants que ceux que l'on peut rencontrer dans les réseaux filaires. La nature

même de ces pertes est différente. En effet, dans un réseau filaire, les pertes sont souvent dues à des congestions contrairement aux réseaux sans fil où les pertes sont majoritairement dues à des problèmes de transmission du signal. Les protocoles de transport filaires reconnus tels que TCP ne sont donc pas les mieux adaptés pour des réseaux sans fil. Ils s'intéressent principalement à la résolution des problèmes de congestion en introduisant des délais entre deux transmissions alors que dans le cas de pertes sans fil, il serait préférable de réémettre le plus rapidement possible. Tout comme dans les réseaux filaires, il est impossible de parler à un nœud en particulier. Tous les nœuds peuvent recevoir les paquets émis par leurs voisins même si ceux-ci ne leurs sont pas destinés et ceci de manière beaucoup plus simple que dans un réseau filaire car les communications se déroulent dans l'air, ce qui pose un problème évident de sécurité.

Les terminaux composant les réseaux sans fil ont également la particularité de pouvoir être mobiles ce qui n'est pas le cas dans un réseau filaire. Cette mobilité va augmenter les problèmes de propagation du signal dans la mesure où un nœud mobile va voir évoluer les conditions de propagation du milieu qui l'entoure en fonction de sa position. Ceci va également pouvoir avoir un impact sur la topologie du réseau notamment dans le cas des réseaux Ad-Hoc. Ces terminaux mobiles peuvent également être limités en énergie ce qui peut poser des problèmes. En effet, un terminal va consommer de l'énergie pour envoyer et recevoir des paquets mais également pour écouter périodiquement le canal si bien qu'il peut disparaître à tout moment par simple manque d'énergie.

#### **II.4.2. Orientation de nos travaux**

Le support de transmission sans fil étant immatériel, il permet de gagner largement en poids, il peut traverser des cloisons sans nécessité de perçage et permet une forte mobilité des appareils connectés. En revanche, si les gains sont importants sur ces aspects, l'utilisation du sans fil amène son lot de contraintes qui empêche la transposition directe des mécanismes utilisés sur les bus filaires au sans fil. Par exemple, le phénomène d'aveuglement empêche la détection des collisions en temps réel, la forte variabilité des caractéristiques du médium radio entraîne une grande incertitude sur la fiabilité des liens et la forte atténuation du médium immatériel implique des portées limitées qui ne sont pas toujours simples à appréhender, même avec beaucoup d'expérience. Les perspectives de recherches, tant sur la couche

physique que sur les protocoles de niveaux supérieurs, restent toujours importantes dans ce domaine.

Pourtant, dans le cadre d'une application communicante temps réel, la transmission de l'information doit être fiable. En plus des performances moyennes globalement correctes, certaines applications peuvent nécessiter un moyen d'acheminement de l'information qui soit en mesure de proposer des garanties, par exemple, sur le volume d'informations à transmettre dans un temps donné (débit) ou le délai de remise d'un message (latence). Il est nécessaire d'introduire des fonctionnalités de Qualité de Service pour la gestion du réseau. Pour une application temps réel utilisant des mesures issues de capteurs et établissant des commandes à appliquer sur le procédé à travers les actionneurs, l'aspect temporel est primordial car la donnée représentant la grandeur physique mesurée/appliquée perd sa pertinence avec le temps ; si le résultat de la mesure par exemple arrive avec un délai trop important, il doit être ignoré par l'applicatif car obsolète. Il est donc nécessaire, pour cette catégorie d'applications à très fortes contraintes temporelles, de concevoir des méthodes de transmission permettant de garantir le délai du transport de l'information.

Bien qu'utilisant un médium imparfait, il est cependant possible de fiabiliser une transmission sans fil. Cette fiabilisation doit être un souci permanent pour le concepteur, à chaque niveau de la pile protocolaire. Au niveau physique, il existe des techniques reconnues et largement utilisées telles que le codage du canal ou la redondance des données émises. Cependant, même si ces techniques permettent de rendre plus robuste la transmission radio, elles ne permettent pas de garantir que 100% des transmissions seront reçues sans erreur. Il est alors parfois nécessaire de prévoir la retransmission des données erronées, ce qui, dans le cadre d'une application à fortes contraintes temporelles, entraîne des délais aléatoires qui peuvent se révéler gênants et qui accentueront l'aspect aléatoire de la couche physique.

Pour les couches supérieures, le premier élément susceptible d'introduire des incertitudes « au dessus » de la couche physique est l'algorithme de la méthode d'accès au médium. La méthode d'accès au médium (MAC) est le protocole mis en place pour gérer les accès concurrents au médium partagé ; il se situe directement au-dessus de la couche physique et permet de minimiser, voire supprimer le phénomène

des collisions, c'est-à-dire d'empêcher que deux émetteurs utilisent le même médium en même temps. En effet, si plusieurs émetteurs utilisent le médium partagé au même moment, il est probable que la résultante de la communication soit inaudible pour tous les destinataires. Selon les objectifs attendus, le protocole de la méthode d'accès peut être conçu de différentes manières, l'essentiel étant en premier lieu, que toutes les entités susceptibles de s'échanger des messages suivent le même protocole. Dans la suite de ce travail de magister, nous nous intéresserons aux méthodes d'accès MAC des réseaux locaux sans fil (WLAN). Nous nous attacherons à étudier profondément leurs spécifications et à analyser leurs aptitudes à assurer des garanties déterministes sur l'aspect temporel de la remise des messages contraint temporellement.

## **II.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à montrer l'intérêt de l'utilisation des réseaux sans fil pour les applications du monde de l'automatique. Nous avons pu remarquer que le recours à ces technologies sans fil est devenu incontournable, précisément dans les situations où les applications engagent des entités mobiles ou encore le déploiement d'une infrastructure câblée présente un risque pour les hommes ou pour l'environnement. Dans ce genre de situation, nous avons conclu qu'un réseau sans fil l'emporte avec excellence et est considéré comme le meilleur candidat pour remplacer son homologue filaire. Ainsi, nous avons donné une vue d'ensemble des réseaux sans fil à travers une classification basée sur la portée de communication.

S'il est vrai que l'utilisation des réseaux sans fil apporte des avantages en termes de mobilité, flexibilité et réduction de coûts, leurs déploiements dans un contexte plus sensible aux pertes et aux délais de livraison de messages nécessitent une étude approfondie des mécanismes de transmission et de méthodes d'accès qui orchestrent le médium partagé. La fiabilisation des communications doit être le souci du concepteur sur toutes les couches de la pile protocolaire (PHY et MAC en particulier). Dans le cadre de ce mémoire, nous avons choisi d'orienter nos travaux sur l'élaboration d'une proposition qui soit en mesure de fournir des garanties au niveau couche liaisons de données sur une qualité de service temporelle dans la norme IEEE 802.11.

# Chapitre 3

---

## **Protocoles MAC et QoS temporelle dans les réseaux WLANs**

---

### **III.1. Introduction**

Dans les techniques de télécommunications, un des problèmes fondamentaux est le contrôle d'accès au médium partagé. Dans la mesure où une perturbation risque de dégrader considérablement les performances du réseau de communication, on cherchera généralement à éviter que deux émetteurs émettent en même temps sur le même canal. Pour résoudre cette problématique, les concepteurs ont été amenés à développer des méthodes d'accès au médium, c'est-à-dire des algorithmes permettant de minimiser voire supprimer le phénomène des collisions. On parlera aussi de contrôle d'accès au médium, et plus souvent en anglais, de Medium Access Control, ou MAC.

Nous aborderons ce chapitre par donner des notions fondamentales et des principes de base sur le contrôle d'accès au médium et de la qualité de service (section III.2). Nous nous pencherons par la suite sur une analyse des aptitudes temps réel des protocoles MAC standard des réseaux WLANs (section III.3). Ensuite, présenterons un panorama de solutions à qualité de service introduites dans la couche MAC IEEE 802.11, et nous finirons par donner notre approche de contribution (section III.4).

## III.2. Préliminaires

Dans cette section, nous allons donner des préliminaires sur le contrôle d'accès au médium (MAC) partagé et de la qualité de service (QoS) des réseaux. Ces deux concepts MAC et QoS, constituent les mots clés les plus primordiaux de ce travail de Magister, dont la compréhension des notions fondamentales et des principes de bases, nous semble une réelle nécessité pour pouvoir appréhender la problématique de ce mémoire, l'état de l'art et éventuellement notre approche de contribution.

### III.2.1. Principes de base du Medium Access Control (MAC)

Le canal de communication est généralement utilisé par plusieurs éléments communicants du réseau car il est doté d'une certaine capacité. Il suffit de coordonner la répartition de cette capacité pour faire cohabiter plusieurs émetteurs sur le même canal de communication sans qu'ils se perturbent et que leurs données émises n'entrent en collision. On parlera dans ce cas, d'accès multiple au médium ou de multiplexage, comme l'illustre la figure III.1.



**Figure III. 1 :** Procédé de multiplexage/Démultiplexage pour la cohabitation de plusieurs trafics sur le même médium partagé.

Le multiplexage consiste à diviser une composante du canal pour le répartir sur  $n$  émetteurs. En télécommunications, on considère qu'il existe trois types de multiplexage de base (trois espaces du canal divisibles) [56]:

**Un multiplexage de type fréquentiel**, ou FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) dans lequel l'espace fréquentiel est divisé entre tous les émetteurs. L'émission peut alors se faire temporellement en continu. Le FDMA est simple à mettre en œuvre mais son inconvénient principal est qu'il faut un récepteur dédié par canal à écouter. Cette technique de multiplexage est la plus ancienne; elle est encore largement utilisée dans les diffusions comme la télévision et la radio.

**Un multiplexage de type temporel**, ou TDMA (*Time Division Multiple Access*) dans lequel l'espace temporel est divisé entre tous les émetteurs. L'émission peut alors se faire sur la même bande de fréquence puisque celle-ci est tour à tour utilisée par les différents émetteurs du réseau. La méthode du TDMA est intéressante dans la mesure où il n'est pas nécessaire de changer de fréquence pour écouter d'autres émetteurs. En revanche, les émetteurs doivent se synchroniser pour ne pas utiliser le canal en même temps. Le TDMA est très adapté aux transports d'informations de type paquets ; c'est aussi pour cette raison que son principe est largement utilisé.

**Un multiplexage par codage**, ou CDMA (*Code Division Multiple Access*) dans lequel l'espace des codes est divisé entre tous les émetteurs. Chaque émetteur possède un code unique que ses récepteurs doivent connaître. Dans l'idéal, les codes choisis doivent être orthogonaux, c'est-à-dire qu'ils doivent respecter des propriétés mathématiques qui les rendent « totalement différents » y compris d'un point de vue spectral ; dans ce cas, si un récepteur ne connaît pas le code d'un émetteur, son signal sera reçu comme du bruit. Le CDMA, en tant que méthode d'accès, est assez peu utilisé dans la pratique, bien que le principe de l'étalement de spectre sur lequel il repose, soit, lui, largement utilisé, mais plutôt pour ses propriétés de fiabilisation de la transmission.

Bien entendu, ces trois multiplexages « de base » peuvent être combinés pour donner lieu à des techniques de multiplexages élaborées comme le FHSS, qui associe TDMA et FDMA en réalisant des sauts de fréquences. Plus simplement, d'autres techniques de diffusion comme le DVB-T (utilisé pour la Télévision Numérique Terrestre, TNT) ou le DVB-S (pour les Radios, Télévisions et services de données par satellite géostationnaire) prévoient d'émettre sur plusieurs fréquences (FDMA) et multiplexer plusieurs programmes sur une même fréquence (TDMA). On pourra également noter le cas particulier de l'OFDMA, basé sur le principe de l'OFDM, qui permet à plusieurs stations d'émettre en même temps sur des sous-porteuses différentes (un peu comme en FDMA) mais en ne nécessitant qu'un seul récepteur capable de recevoir simultanément toutes les sous-porteuses. Cependant, dans le cadre du TDMA, le temps est divisé entre tous les émetteurs et il est nécessaire de répartir ce temps, si possible, de manière automatique et flexible. Bien que le concept de TDMA soit très simple à envisager, sa mise en œuvre, en revanche, n'est pas chose aisée.

Dans les sections III.3 et III.4 de ce chapitre, nous allons voir plusieurs techniques d'accès au médium implémentées dans les technologies présentées dans le chapitre II. Nous allons également constater que la plupart de ces méthodes d'accès sont basées sur des protocoles aléatoires qui ne règlent pas de manière certaine le problème des collisions, ce qui d'un point de vue qualité de service, peut poser problème.

### **III.2.2. Notions fondamentales et principes de Qualité de Service**

En réseau, la notion de Qualité de Service regroupe toutes les méthodes permettant de garantir la disponibilité du réseau pour ses utilisateurs. La notion de QoS repose sur l'hypothèse suivante : *le réseau possède des ressources finies et une pénurie de ses ressources est fortement possible dans des conditions d'utilisation raisonnables*. Le réseau étant utilisé simultanément par de nombreux utilisateurs dont les comportements individuels sont indépendants, ce risque de pénurie existe et il est tout à fait probable : cette pénurie serait provoquée par une demande d'utilisation massive et simultanée de la ressource partagée et aurait pour conséquence la congestion du réseau. Elle peut alors se traduire par un blocage des données et un effondrement partiel ou total des performances du réseau (augmentation de la latence de transmission, baisse du débit offert, pertes de paquets, etc.).

Dés lors, les bénéfices engendrés par une gestion fine de la QoS profitent aussi bien aux utilisateurs (meilleure disponibilité du réseau) qu'aux opérateurs (possibilité de facturer l'utilisateur en conséquence). De ce fait, la Qualité de Service est un domaine de recherche et d'application vaste et prometteur car il vise à fiabiliser considérablement le réseau, à éviter la pénurie des ressources et la dégradation de ses performances globales. Nous pouvons opposer au concept de Qualité de Service la notion de surdimensionnement. Le surdimensionnement consiste à déployer un réseau dont la capacité est largement supérieure aux besoins réels, le risque de pénurie évoqué plus haut est donc minimisé mais toujours probable. Le surdimensionnement va très souvent de pair avec l'utilisation de protocoles basés sur le *Best-Effort*, c'est-à-dire des protocoles ne proposant ni priorités ni garanties mais dont les performances sont acceptables dans la plupart des cas.

La mise en œuvre simple et le coût faible d'un réseau surdimensionné sont deux critères qui favorisent souvent l'utilisation de réseaux très haut débit au détriment d'un réseau à QoS, surtout dans des cas où le médium « ne coûte pas cher » comme dans le cas d'un réseau local filaire. Par exemple, le coût d'installation d'un réseau Ethernet Gigabit peut être très inférieur au coût d'équipements de contrôle de QoS. En revanche, dans d'autres cas où le médium peut avoir un coût d'utilisation plus élevé, l'utilisation de protocoles à QoS est rentable. Notons que la notion de « coût d'utilisation » n'est pas forcément d'ordre financier ; le médium peut être une ressource rare (réseaux sans fil hertziens, réseaux aquatiques acoustiques, réseaux à économie d'énergie) qu'il est important d'économiser. Le réel inconvénient d'un réseau à QoS est qu'il nécessite une administration pointue pour être efficace. De plus, sur un réseau flexible comme un réseau paquets, la mise en œuvre de la Qualité de Service affaiblit cette flexibilité et soulève des problématiques que l'on rencontre généralement sur un réseau commuté.

La mise en œuvre de la Qualité de Service sur un réseau implique certaines conditions. Celles-ci sont détaillées ci-après.

**La prédictibilité du trafic :** La mise en œuvre d'un réseau à Qualité de Service repose sur la prédictibilité du trafic. Pour pouvoir assurer une qualité constante quelque soit la charge, l'administrateur doit être en mesure de pouvoir décrire précisément la physionomie de chaque trafic transporté par le réseau. Il est donc nécessaire d'évaluer les ressources demandées par les utilisateurs. On considère généralement qu'il n'est pas nécessaire pour l'application de savoir comment l'information est acheminée de bout en bout par le réseau ; cependant, l'utilisateur final est sensible à certaines propriétés qui ont un impact direct sur sa satisfaction vis-à-vis du réseau. On considère généralement que son ressenti peut se résumer par quatre paramètres qui sont :

1. **La latence :** le délai instantané qui influe la transmission de bout en bout ;
2. **La gigue :** la différence de latence entre les paquets ;
3. **Le débit :** le volume d'informations transportées par unité de temps ;
4. **La perte de paquets :** le taux de paquets qui n'arrivent pas à leur destination.

**Le contrôle d'admission :** Un réseau à Qualité de Service ne peut pas s'engager à transporter tous les flux qui se présentent à lui ; la mise en application d'un protocole

à QoS va obligatoirement de pair avec la mise en place d'un système de contrôle d'admission, c'est-à-dire un système qui agit en entrée du réseau et dont le rôle est d'accepter ou de refuser la prise en charge d'un nouveau trafic par le réseau. Un réseau à QoS connaît ses limites et refusera la prise en charge d'une nouvelle demande qui ne pourra pas être satisfaite dans les conditions demandées.

**Les degrés de Qualité de Service :** Les trois principaux degrés de Qualité de Service (trois niveaux de services), du plus fiable au plus lâche, sont les suivants :

1. **Le service garanti :** Il vise à émuler une liaison spécialisée ; malgré un multiplexage des paquets sur le médium, le lien propose les mêmes garanties que s'il était basé sur une ligne indépendante. Des pertes de paquets ou une certaine gigue peuvent néanmoins être acceptées en fonction du contrat négocié. Au niveau technologies, le service garanti se retrouve avec le GS (*Guaranteed Service*) de IntServ, le EF (*Expedited Forwarding*) de DiffServ et le CBR (*Constant Bit Rate*) de l'ATM.
2. **Le service « mieux que Best-Effort ».**
3. **Le service Best-Effort :** Tous les trafics sont traités de la même manière. Le protocole IP de base en est un exemple, ou encore UBR de l'ATM (*Unspecified Bit Rate*).

En pratique, l'application de la QoS sur le réseau se concrétise par deux types d'actions :

**La différenciation de services :** Dans le cadre de la différenciation de services, certains trafics sont traités prioritairement par rapport à d'autres : on parle de traitement préférentiel d'un paquet de données. La différenciation de services est réalisée d'une part grâce à *un marquage* des paquets (*tagging*) pour identifier leur niveau de priorité (ce marquage peut être réalisé au moment de l'admission dans le réseau) et d'autre part grâce à *un ordonnancement* au niveau du prétraitement et de l'émission sur le réseau : dans les routeurs, les paquets de données ne seront pas traités selon le principe du « *premier arrivé, premier servi* » (FIFO, *First In, First Out*) mais selon leur priorité. La différenciation de services ne permet pas d'apporter de garantie absolue ; la seule garantie est relative aux autres trafics (plus prioritaire, moins prioritaire, ou de même priorité).

**La réservation de ressources :** Dans le cadre de la réservation de ressources, il est possible de garantir l'acheminement des informations sur le réseau car une partie de ses ressources matérielles sera bloquée et dédiée à l'acheminement de cette information. Un réseau de type paquets avec réservation de ressources a une fiabilité proche de celle d'un réseau à commutation de circuits, le challenge étant de parvenir à une description physiologique du trafic la plus fidèle possible (la plus proche possible de la réalité) pour ne réserver que les ressources nécessaires, et pas plus.

Dans ce paragraphe, nous avons donné des notions fondamentales et des principes de Qualité de Service. Ces dernières, nous aideront à comprendre l'embryon des solutions à Qualité de Service envisagées pour la couche MAC IEEE 802.11. Ces solutions feront l'objet de la section III.4.

### **III.3. Protocoles MAC standards et aptitudes temps réel des réseaux WLAN**

Cette section sera consacrée à la présentation des protocoles MAC standards des réseaux WLAN. Nous commencerons par les protocoles de la norme européenne HiperLAN. Par la suite, nous passerons aux protocoles de la norme américaine IEEE 802.11. Notre objectif, est d'analyser les aptitudes de ces protocoles à fournir des garanties sur le plan temporel pour des applications temps réel à caractère strict.

#### **III.3.1. Protocoles MAC du Standard HiperLAN**

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les techniques d'accès au médium (EY-NPMA et TDMA Dynamique) proposées par l'ETSI respectivement pour les normes européennes des réseaux WLAN (HiperLAN/1 et son successeur HiperLAN/2). Bien que ces deux déclinaisons du standard HiperLAN aient été abandonnées, les protocoles MAC qu'elles utilisent offrent une certaine qualité de service vis-à-vis du transport d'informations à contraintes temporelles.

##### **III.3.1.1. EY-NPMA (HiperLAN/1)**

La méthode d'accès au médium proposée par l'ETSI pour HiperLAN/1 est le EY-NPMA (*Elimination Yield - Non-preemptive Priority Multiple Access*). Cette technique d'accès au médium limite les collisions en les regroupant en début de

trame et en les détectant, de manière à les éviter dans la suite de la transmission, jusqu'à la trame suivante [86] [87]. L'accès au médium est réalisé en trois étapes :

- 1) **Résolution des priorités** : Le mécanisme d'accès tente d'attribuer le médium à la station la plus prioritaire. Cinq niveaux de priorité sont prévus, de 0 (le plus prioritaire) à 4 (le moins prioritaire). Chaque nouvelle période de contention débute par 5 slots, un pour chaque niveau de priorité. Une station de priorité  $n$  n'a le droit de prendre la parole qu'à partir du slot  $n$  et seulement si aucune autre station plus prioritaire n'a pris la parole avant.
- 2) **Phase d'élimination** : Une station voulant prendre le médium durant la phase de résolution des priorités émet alors un flot de données quelconque (*burst*) de durée aléatoire. Cette durée est distribuée selon une loi de probabilités discrètes. Toutes les stations de priorité  $n$  émettent ce flot de données quelconques.
- 3) **Phase de capitulation** : Une fois cette durée aléatoire écoulée, la station passe à l'écoute. Si aucune autre station n'est entrain d'émettre, cela signifie qu'elle a gagné l'accès au médium. Elle peut alors émettre ses données. Si une autre station est entrain d'émettre, elle « capitule » et ne transmettra pas ses données pendant cette période ; elle devra retenter sa chance à la période suivante.

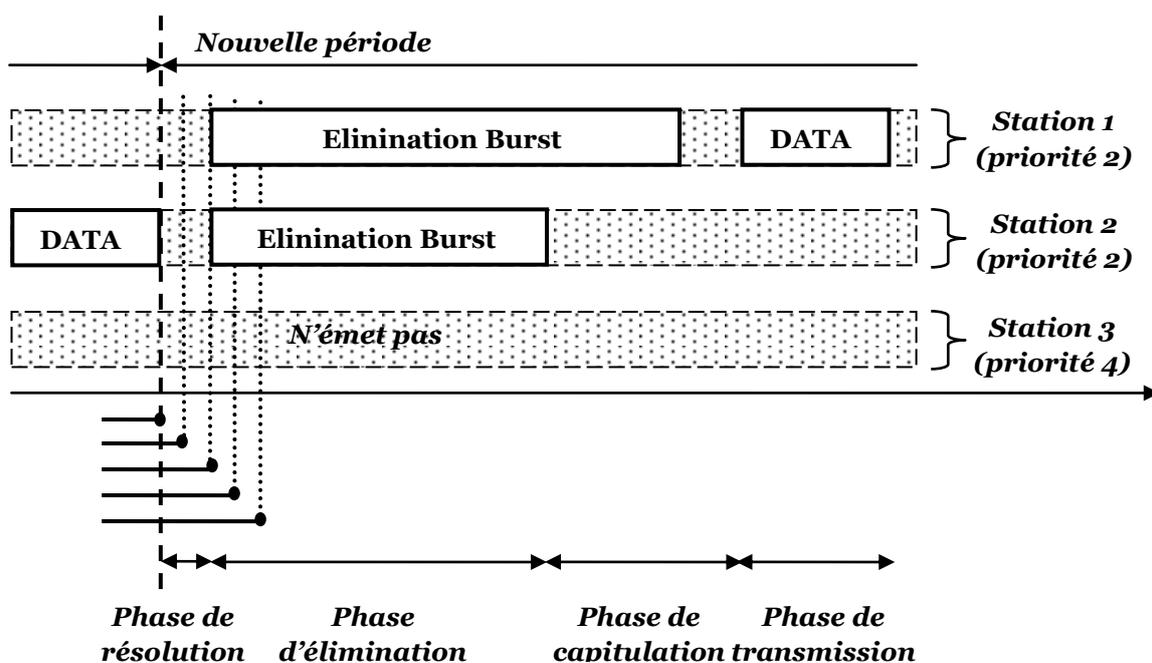
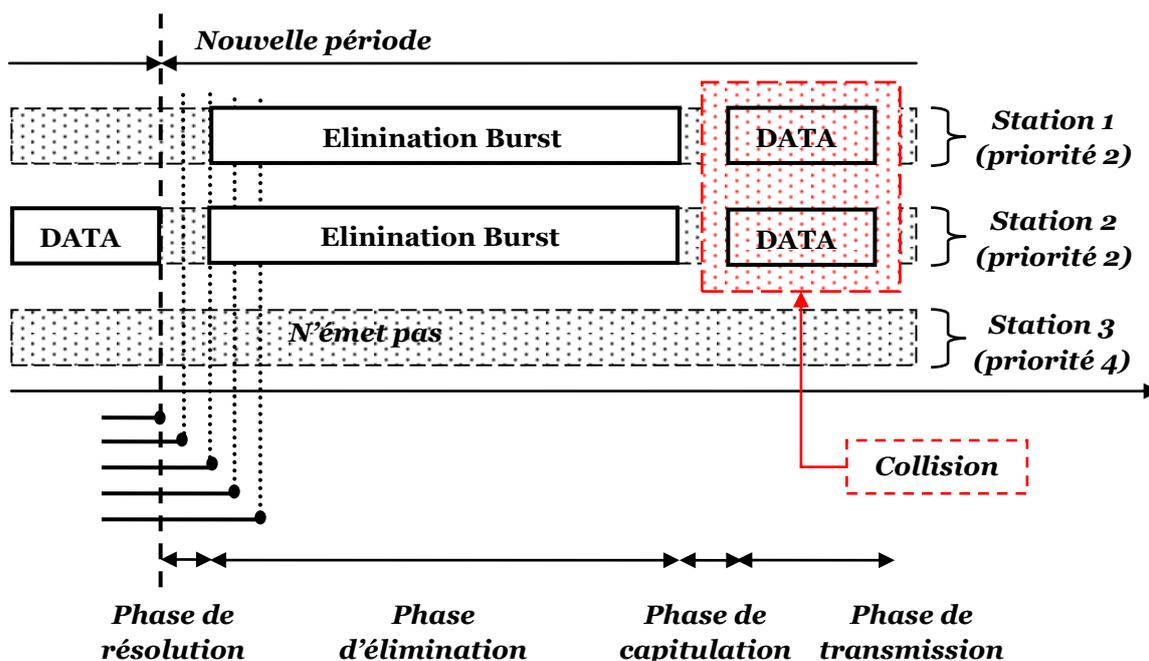


Figure III. 2 : Déroulement d'un accès au médium réussi par la méthode EY-NPMA.



**Figure III. 3 :** Déroulement d'un accès au médium échoué par la méthode EY-NPMA

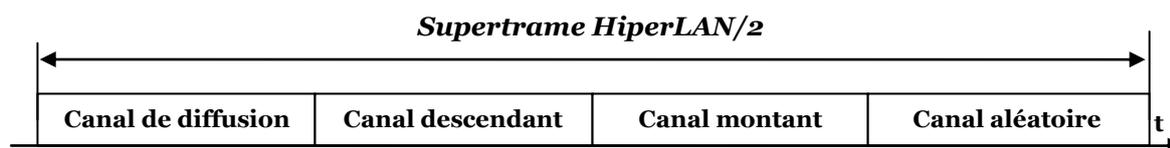
La figure III.2 illustre le déroulement d'un accès au médium réussi par EY-NPMA. Dans ce cas, le réseau est composé de trois stations, dont deux ont le même niveau de priorité. Au final, c'est la station N°1 qui remporte l'accès au médium. En revanche, si deux stations de même priorité choisissent la même durée aléatoire, la phase de capitulation ne permettra pas de détecter la station concurrente et une collision sera produite (voir la figure III.3).

Dans le cadre d'HiperLAN/1, l'ETSI propose donc la mise en œuvre d'une méthode d'accès qui règle le problème des collisions en se basant sur des grandeurs aléatoires, mais en permettant à certains flux ou certaines stations d'être prioritaires devant d'autres. Cette notion de *différenciation de service* que nous avons abordé plus haut est un premier pas vers l'intégration de la *Qualité de Service* dans le réseau. Cependant, et c'est là l'objectif de nos travaux, cette méthode d'accès n'offre aucune garantie sur le plan temporel, puisque la méthode d'accès n'est pas déterministe : en effet, si deux stations de même priorité tirent la même période aléatoire dans la phase d'élimination, il y a collision, comme l'illustre la figure III.3.

### III.3.1.2. TDMA Dynamique (HiperLAN/2)

La méthode d'accès au médium proposée pour HiperLAN/2 est le TDMA Dynamique [86]. Rappelons que HiperLAN/2 est un réseau infrastructuré, c'est-à-

dire constitué de points d'accès (AP) qui permettent à des terminaux sans fil d'accéder à un réseau filaire. Les communications se font en mode connecté; chaque demande de connexion est effectuée par un terminal qui communique ses besoins au point d'accès. Ce dernier divise le temps en portions appelées « supertrame ». A l'intérieur de la supertrame, le temps est encore divisé en quatre canaux temporels, comme illustré par la figure III.4 :



**Figure III. 4 :** La supertrame d'HiperLAN/2.

**Canal de diffusion (broadcast channel):** Il contient des informations destinées à tous les terminaux telles que sa puissance d'émission, son identifiant et l'identifiant du réseau, la structure des canaux descendant et montant (ressources accordées), les données diffusées, etc.

**Canal descendant (downlink channel):** Il contient les données transportées dans le sens « point d'accès vers stations » selon la répartition décrite dans le canal de diffusion. Les données sont découpées en PDU (*Protocol Data Unit*) de 54 octets.

**Canal montant (uplink channel):** Il joue un rôle similaire au canal descendant mais dans le sens « terminaux vers point d'accès ». L'accès au médium se fait alors sans collision.

**Canal d'accès aléatoire (random access channel) :** Cette période est accordée par le point d'accès pour que les terminaux puissent effectuer les demandes de ressources pour les trames suivantes. Dans ce créneau temporel, l'accès au médium se fait en mode aléatoire.

Pour s'associer au réseau, un terminal HiperLAN/2 doit s'identifier auprès du point d'accès par l'envoi d'un message dans le canal d'accès aléatoire. Une fois l'accès accordé et la communication établie par le point d'accès, celui-ci accorde des slots temporels à ce nouveau terminal, en fonction des besoins qu'il a communiqué durant le canal aléatoire. Le transport des données se fait alors sans collision dans le canal montant. Les données à destination des stations connectées sont quant à elles

transportées dans le canal descendant. Le TDMA Dynamique proposé pour HiperLAN/2 limite donc fortement les collisions, au moins dans les phases *downlink* et *uplink channel*. Cependant, sur le plan temporel, cette méthode d'accès n'assure pas de garantie quant à la latence de transmission des données, car la demande de connexion au réseau est effectuée en mode aléatoire.

En revanche, une fois la connexion établie et sous l'hypothèse qu'un terminal pourra effectuer sa demande de réservation de ressources à chaque supertrame, il est alors certain d'accéder régulièrement au médium, ce qui, mis à part la latence engendrée par les erreurs de transmission, permet de proposer une garantie de niveau liaison de données sur le débit offert et la latence. On peut d'ailleurs noter ici qu'HiperLAN/2 applique de fait le vieux principe adopté en télécommunications qui consiste à assurer la qualité des communications déjà engagées au détriment d'éventuelles nouvelles connexions. Or, l'hypothèse que la demande de réservation de ressources parviendra de manière certaine au point d'accès à chaque supertrame est trop forte et n'est pas toujours réaliste (valide), car celle-ci est effectuée durant le canal d'accès aléatoire. La transmission durant le canal aléatoire engendre inévitablement des problèmes de synchronisation, entre les stations, qui conduisent à des collisions. De fortes chances que la durée du canal aléatoire s'écoule et des stations n'ont pas réussi à envoyer leurs demandes de réservation. Ceci s'avère très pénalisant particulièrement pour des stations possédant des trafics contraints temporellement.

Le TDMA Dynamique d'HiperLAN/2 impose que toute communication doit transiter obligatoirement par le point d'accès, notons que ce phénomène est récurrent dans le monde des réseaux centralisés (avec infrastructure). Bien que ces réseaux construits autour de points d'accès sont les mieux adaptés pour le transport d'informations à contraintes temporelles (car ils gèrent mieux les ressources de transmission en organisant les accès au canal et en limitant fortement les collisions), chaque communication entre un nœud source et un nœud destinataire consomme une double bande passante et requière une latence beaucoup plus importante par rapport aux communications point à point (directes). En particulier avec HiperLAN/2, l'envoi et la réception d'une trame de données, entre un nœud source et un nœud destinataire, sont séparées par une durée d'une supertrame qui s'ajoute aux délais de transmissions de la trame du nœud source au point d'accès et du point

d'accès au nœud destinataire. Pour les trames de données à contraintes temporelles, le mode de communication par le biais du point d'accès n'est pas recommandé car il prolonge d'avantage les délais de remise des trames de données. Or, dans le cadre des communications temps réel, nous cherchons à simplifier la procédure de transfert des données afin de garantir que celles-ci arrivent bien avant leurs échéances (dates limites autorisées).

### **III.3.2. Protocoles MAC du Standard IEEE 802.11**

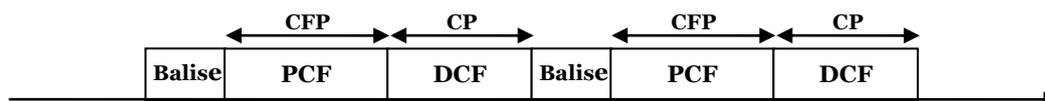
Dans ce paragraphe, nous présenterons les principaux mécanismes mis en œuvre dans la sous couche MAC du standard IEEE 802.11 pour gérer les accès multiple au support sans fil. La norme 802.11 est la plus diffusée au monde pour l'usage à grand public, et sa technique d'accès CSMA/CA est largement adoptée par la plupart des normes de réseaux sans fil. Cependant, l'utilisation de cette norme pour des applications plus sensibles aux délais et aux taux de pertes nécessite une étude plus approfondie de ses mécanismes d'accès. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'objectif de notre étude de la norme IEEE 802.11.

#### **III.3.2.1. Principes de base de la couche MAC IEEE 802.11**

L'objectif principal de la couche MAC du standard IEEE 802.11 est de fournir des services de transmission fiables pour les protocoles de couches supérieures. La séquence d'échange minimale de ce protocole est composée de deux trames (une trame de données envoyée de la source à la destination et une trame d'acquittement envoyée de la destination à la source une fois que la trame de données est reçue avec succès). Pour chaque trame reçue au niveau de la couche MAC, la FCS (*Frame Check Sequence*) est vérifiée. Si l'émetteur ne reçoit pas l'acquittement attendu pour une trame transmise car la vérification de la FCS au niveau du récepteur est échouée, alors la trame est de nouveau retransmise. Ce mécanisme permet de pallier les problèmes des erreurs de transmission causées par les collisions et les phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques et garantit l'intégrité des données au niveau couche liaison de données.

Le groupe de travail IEEE a défini deux méthodes d'accès au médium pour le standard 802.11 [88][89]: *DCF (Distributed Coordination Function)*; une fonction d'accès distribuée basée sur la contention et *PCF (Point Coordination Function)*; une fonction d'accès centralisée où toutes les communications sont orchestrées par le

point d'accès. La méthode d'accès fondamentale est la DCF, alors que la méthode PCF est optionnelle (d'ailleurs, elle est peu implémentée en pratique). Pour permettre la cohabitation entre ces deux méthodes d'accès, le standard IEEE 802.11 a défini des intervalles de temps, appelés « *supertrames* », qui sont partagés en deux périodes : une période sans contention CFP (*Contention Free Period*) durant laquelle la PCF est utilisée et une période de contention CP (*Contention Period*) avec l'utilisation de la DCF (Voir la figure III.5).



**Figure III. 5 :** L'alternance des modes PCF et DCF.

### III.3.2.2. Distributed Coordination Function (DCF)

La méthode d'accès fondamentale DCF fonctionne en mode *Best-Effort*, c'est-à-dire sans priorité et sans garantie. Elle est recommandée pour transporter les trafics ne nécessitant pas de garantie sur la latence de transmission ou le débit offert (téléchargement, navigation sur Internet, etc.). DCF utilise la technique d'accès CSMA/CA (*Carrier Sence Multiple Access with Collision Avoidance*), une adaptation du CSMA/CD (*Collision Detection*) qui est utilisée par le protocole Ethernet (IEEE 802.3) dans les réseaux LAN (*Local Area Network* ; les réseaux locaux filaires). Avec CSMA/CD, la station émettrice transmet un signal et écoute en même temps le canal pour détecter d'éventuelles collisions avec d'autres signaux présents sur le canal. Cependant, dans un réseau sans fil, les collisions ne sont pas détectées par la station émettrice car le signal émis par cette station est beaucoup plus puissant pour masquer les autres signaux présents sur sa portée de communication (son voisinage). Ainsi, avec CSMA/CA, la station émettrice écoute le canal uniquement avant de commencer la transmission pour vérifier qu'il n'est pas occupé. Ceci n'empêche pas l'apparition des collisions et pour y remédier le mécanisme d'acquittement est utilisé pour réémettre les trames collisionnées.

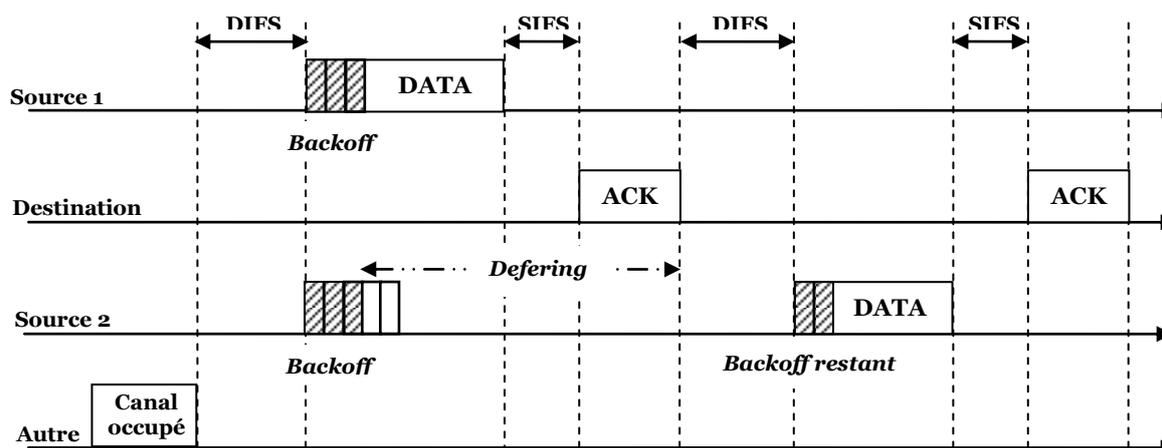
Le mode DCF du protocole IEEE 802.11, se base sur un jeu d'intervalles de temps appelé IFS (*Inter Frame Spacing*). Lorsqu'une station souhaite émettre une trame de données, elle écoute le médium durant un intervalle de temps DIFS (*Distributed IFS*). Si celui-ci est libre pendant cette période, la station transmet

immédiatement sa trame de données. Après un DIFS, il se peut que plusieurs stations détectent en même temps le médium libre et transmettent alors au même moment leurs trames de données respectives. Ces trames sont perdues (collisionnées), ceci conduit à une perte de bande passante (c'est-à-dire que l'occupation du canal pour la transmission de ces trames est inutile vis-à-vis du réseau) et une livraison retardée des trames de données (prolongation des délais de remise des messages).

Pour réduire la probabilité de telles collisions, une fois que la station a terminé de décrémenter son DIFS, elle calcule un temps aléatoire appelé BT (*Backoff Time*) durant lequel elle s'abstient de transmettre. Plus précisément, le BT représente un nombre de slots temporels choisi aléatoirement dans un intervalle  $[0, CW]$  appelé fenêtre de contention (*CW : Contention Window*). Le compteur de *backoff* est décrémenté d'un slot de temps à chaque fois que le canal est détecté libre pendant une durée DIFS. Il est suspendu dès que le canal devient ou redevient occupé. Le processus de *backoff* reprend son fonctionnement quand le canal est de nouveau détecté libre pour une période de temps égale à DIFS. Une fois que le compteur de *backoff* atteint la valeur zéro, la station transmet son MSDU (*MAC Service Data Unit*) immédiatement. Pour chaque réception d'une trame réussie, la station réceptrice envoie une trame d'acquiescement à l'émetteur après un SIFS (*Short IFS*). Ce dernier est utilisé pour séparer les trames d'un même dialogue, sa valeur est inférieure à celle d'un DIFS. Après toute tentative non réussie de transmission, un autre *backoff* est exécuté avec une taille doublée de CW, ceci réduit la probabilité de collision au cas où il y aurait plusieurs stations qui tenteraient d'accéder au canal. Les stations qui ont reporté l'accès au canal ne choisissent pas un nouveau *backoff* aléatoire, mais continuent à décrémenter leur dernier compteur de *backoff*. De cette manière, la station qui a reporté sa transmission aura une priorité supérieure quand elle va réessayer de transmettre (la figure III.6 illustre les principales règles d'accès de la méthode DCF).

La taille de la fenêtre de contention d'une station est initialisée à une valeur minimale  $CW_{min}$  et augmente d'une manière exponentielle en doublant sa taille à chaque échec de transmission  $((CW + 1) * 2 - 1)$ . La taille de la fenêtre de contention est réinitialisée à  $CW_{min}$  lorsqu'elle atteint la valeur  $CW_{max}$  ; après un nombre limite de retransmissions appelé RL (*Retry Limit*), ou bien après une transmission réussie. La station émettrice exécute un nouveau *backoff* après chaque succès de

transmission, même si elle n'a pas de trames à émettre ; c'est ce qu'on appelle le *post-backoff*. Ce dernier garantit au minimum une période de *backoff* entre deux transmissions successives. Il y a une seule situation dans laquelle une station n'est pas tenue d'exécuter le processus de *backoff* avant de commencer une transmission : c'est le cas où le dernier *post-backoff* ait été réalisé alors que la file d'attente est vide et que le canal a été détecté libre pour une durée minimale de DIFS.



**Figure III. 6** : Règles d'accès dans DCF (méthode de base).

Comme nous venons de le constater, la méthode DCF du Standard IEEE 802.11 est basé sur une technique d'accès CSMA/CA non déterministe (aléatoire) ; les collisions sont inévitables (première source de perte de données au niveau MAC) et les délais d'accès sont aléatoires (délais non connus et non bornés a priori). Avec CSMA/CA, une connaissance même approximative ne peut être fournie sur la latence et le taux de perte du réseau, ce qui est de point de vue *Qualité de Service*, pose un sérieux problème et un souci permanent quant à l'utilisation de cette technique comme protocole d'échange de données, précisément pour des applications critiques (très sensibles aux délais de remise des messages et aux taux de perte de données). Les applications de type industrielles et médicales sont un exemple d'applications qui exigent des garanties strictes (déterministes) sur le plan temporel, ainsi que des taux de perte doivent être faibles (voire négligeables). Malheureusement, ces exigences sont très loin d'être satisfaites par le protocole CSMA/CA qui ne peut fournir qu'un service au mieux.

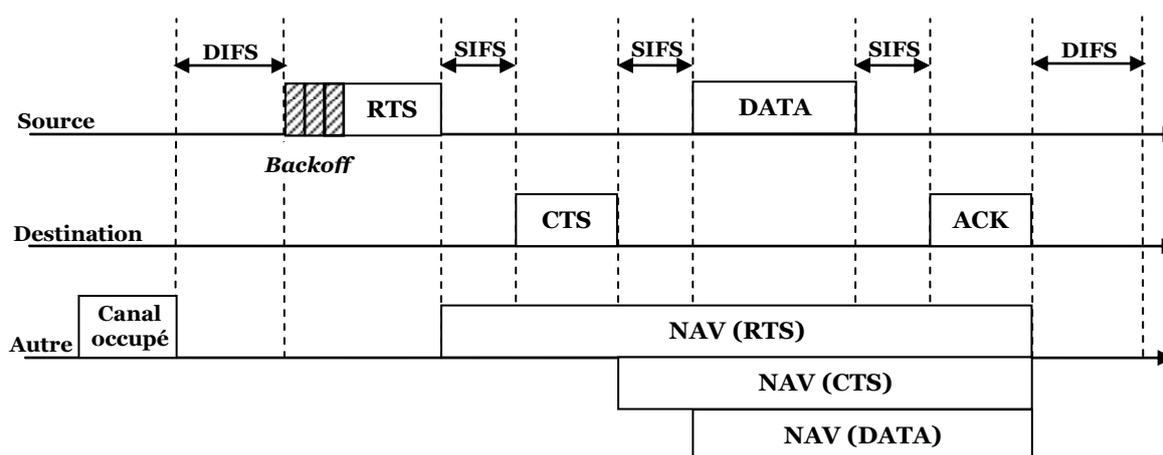
Le mécanisme d'acquiescement et de retransmission des trames de données du protocole CSMA/CA, qui est utilisé comme moyen de fiabilisation des

communications au niveau couche liaison de données, est considéré comme efficace pour des applications de bureautique ne nécessitent aucune exigence ni sur le débit offert ni sur la latence qui cadence les transmissions. En effet, il permet de notifier les trames de données reçues avec succès par le destinataire et de retransmettre les trames corrompues pour lesquelles des acquittements n'ont pas été envoyés par la source (ces trames ont certainement subi un échec de transmission). Malheureusement, dans le contexte des applications temps réel ce mécanisme n'est pas envisageable car il n'est pas adapté à l'acheminement des données à contraintes temporelles ; d'une part, il ne règle pas le problème des collisions et d'autre part, il prolonge les délais de transmission. Or, dans un contexte temps réel les messages sont caractérisés par des échéances qu'il faut impérativement respecter. De plus, les messages temps réel ne sont pas retransmis car dans les meilleurs des cas ils arrivent à destination avant leurs dates limites lors de la première tentative de transmission. Par conséquent, la notification de leurs bonnes réceptions par des acquittements est inutile. Quant au transfert de cette catégorie de messages, il s'agit alors d'offrir un service garanti (déterministe) ; la transmission de ces messages doit s'effectuer d'une manière certaine c'est-à-dire sans collision et avec des délais bornés connus préalablement de façon à vérifier que leurs dates d'arrivée soient bien inférieures à leurs dates limites autorisées par l'application. Les contraintes de l'application temps réel sont ainsi satisfaites et sa cohérence globale est préservée.

Pour améliorer la fiabilité des communications d'un réseau 802.11, le groupe de travail IEEE a développé deux mécanismes optionnels (*RTS/CTS* et *la fragmentation des paquets de données*) qui peuvent fonctionner avec le protocole d'accès CSMA/CA. Le mécanisme de fragmentation au niveau couche liaison de données, a été conçu et implémenté spécialement pour remédier aux phénomènes du monde physique (les problèmes de propagation des ondes électromagnétiques) et leurs influences sur les performances du protocole IEEE 802.11. En effet, la fragmentation permet de réduire la probabilité de perte de longues trames de données et leurs retransmissions respectives. Les trames de données sont alors divisées en fragments qui sont envoyés et acquittés séparément comme des trames individuelles de données. Les couples (fragment, ACK) d'une même trame accèdent séquentiellement au canal et seul une durée SIFS les sépare afin de leurs garantir un accès prioritaire avant toutes autres transmissions. L'évaluation du mécanisme de fragmentation en environnement radio, a constitué notre centre d'intérêt dans des

travaux antérieurs que nous avons réalisé sur l'analyse des performances du Standard IEEE 802.11. Nos résultats d'analyse montrent que la fragmentation des paquets de données permet un niveau d'amélioration significatif des performances de la fonction DCF du protocole IEEE 802.11 [67].

Le mécanisme RTS/CTS (*Request-to-Send/Clear-to-Send*) a été proposé pour réduire les problèmes de collisions et pour apporter une solution au phénomène des nœuds cachés inhérent à CSMA/CA. RTS/CTS est un mécanisme de type *four-way handshaking*, dans lequel une station envoie une trame RTS à sa destination avant de transmettre sa trame de données. La station de destination répond avec une trame CTS quand elle reçoit correctement la trame RTS. A la réception du CTS, la source peut enfin envoyer sa MSDU. La destination à son tour peut acquitter la MSDU lorsque celle-ci est correctement reçue. Les deux trames, RTS et CTS, contiennent des informations sur la durée de transmission des MSDU/ACK à venir. En se basant sur ces informations, toutes les stations de la même portée radio mettent à jour leur temporisateur interne nommé NAV (*Network Allocation Vector*) et reportent toute transmission jusqu'à l'expiration de ce temporisateur. Même si une station cachée n'a pas pu entendre la trame RTS de la station source, elle pourra recevoir la réponse CTS de la station destination. Ainsi, elle mettra à jour son NAV et le problème de la station cachée est minimisé (le mécanisme RTS/CTS est illustré sur la figure III.7).



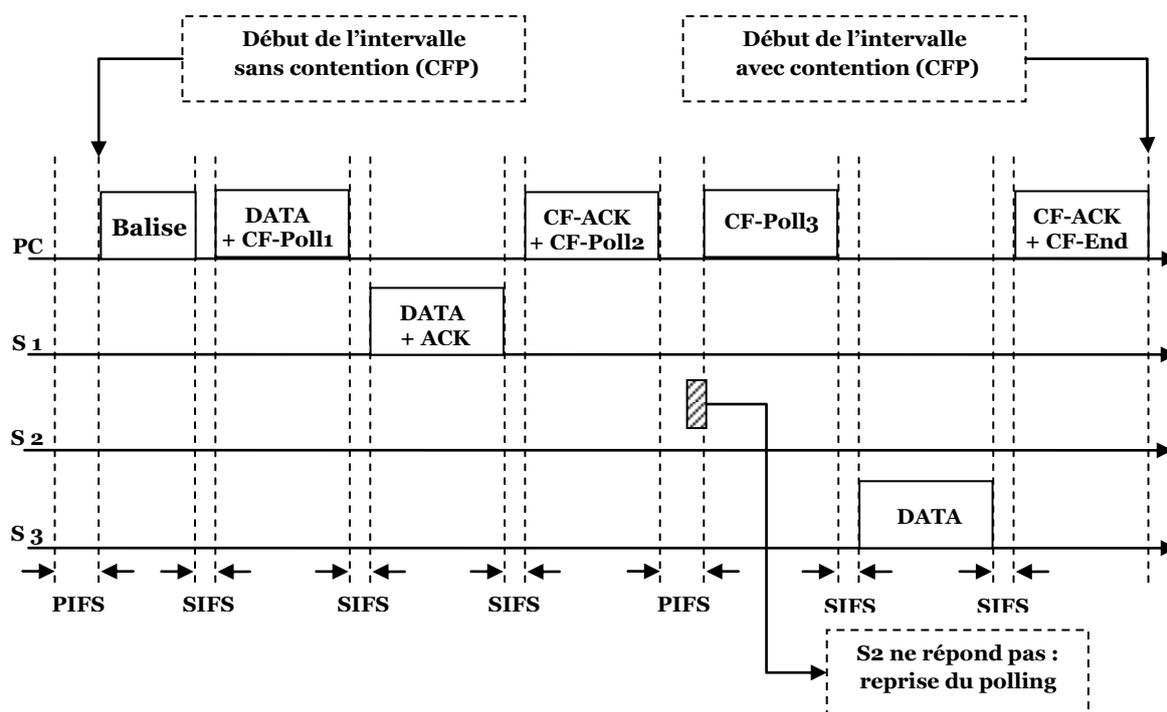
**Figure III. 7** : Règles d'accès dans DCF (méthode RTS/CTS).

Pour terminer ce paragraphe sur la méthode DCF du protocole IEEE 802.11, nous pouvons dire comme nous l'avons énoncé en l'introduisant, cette méthode ne propose qu'un service de type *Best Effort*. En effet, même si le dispositif RTS/CTS

permet d'éviter un grand nombre de collisions, certaines sont inévitables, en particulier quand les deux stations pensent en même temps que le médium est libre. Cette méthode d'accès ne présente donc aucune garantie, ni sur le débit, ni sur la latence. En cas de trafic élevé, les performances du réseau s'écroulent.

### III.3.2.3. Point Coordination Function (PCF)

Pour pallier aux lacunes de la méthode d'accès DCF, l'IEEE a initialement prévu une seconde méthode d'accès au médium pour 802.11, la méthode PCF (*Point Coordination Function*). Elle est basée sur l'interrogation des stations (*Polling*) par une entité spéciale appelée *point de coordination*. Ce rôle sera joué par le point d'accès. La méthode d'accès PCF permet de garantir l'accès au médium pour certaines stations, par exemple pour la transmission de données avec contraintes temporelles et/ou de débit comme la téléphonie ou la vidéo. Notons que, de par sa structure centralisée autour du point d'accès, la méthode d'accès PCF n'est pas utilisable sur un réseau de type ad hoc.



**Figure III. 8:** Déroulement temporel d'une période PCF.

Dans le cadre de la méthode d'accès PCF, le point de coordination orchestre les accès au médium en interrogeant tour à tour les stations qui nécessitent une certaine garantie d'accès au médium. Cette méthode, proche de l'accès basique de type TDMA,

permet d'introduire des priorités pour ces stations par rapport aux stations « normales ». Avec l'accès PCF, le temps est divisé en supertrame, permettant une alternance cyclique entre accès sans contention PCF (CFP : *Contention Free Period*) et accès avec contention en DCF (CP : *Contention Period*). Le déroulement temporel d'une période PCF est illustré sur la figure III.8 et se déroule ainsi :

- Au début de la supertrame, le point de coordination sonde le canal. Si le canal est libre, le point de coordination attend une période PIFS et transmet une trame « balise », ou « beacon ». Cette trame marque le début de la supertrame et de la période d'accès en PCF. Elle contient aussi l'identifiant du réseau (BSSID, *Basic Service Set Identifier*), la période des trames beacon (TBTT, *Target Beacon Transition Time*) et la durée maximale de la CFP (*CFPMaxDuration*). Ces deux dernières données vont permettre aux stations qui minimisent leur énergie de couper leurs fonctions de réception radio ;
- Ensuite, le point d'accès interroge tour à tour les stations (*Polling*). Cette interrogation se fait par l'envoi de trames CF-Pool par le point de coordination si celui-ci n'a pas de données à envoyer à cette station, ou DATA+CF-Pool si des données du point d'accès sont en attente pour la station concernée. Le destinataire, quel qu'il soit, doit acquitter les données par une trame CF-ACK. Si la station interrogée doit envoyer des données, elle peut le faire après réception du CF-Pool ou du DATA+CF-Pool, en répondant respectivement par un DATA ou un DATA+ACK. Notons que tous ces échanges se font en utilisant un temps inter-trame SIFS, sauf si une station ne répond pas à la trame CF-Pool. Dans ce cas précis, le point de coordination reprend le médium après une durée PIFS pour continuer le *Polling*. En tout état de cause, SIFS et PIFS étant plus courts que DIFS, les tentatives d'accès DCF pendant la CFP sont mécaniquement différées.
- Pour finir, le point d'accès envoie une trame CF-End pour indiquer la fin de la période sans contention et, par conséquent, le début de la période avec contention.

De notre point de vue concernant le transport d'informations à fortes contraintes temporelles, la méthode d'accès PCF présente un avantage sur la méthode DCF :

l'accès au médium des stations PCF n'est pas basé sur un algorithme aléatoire, ce qui permet d'entrevoir un embryon de gestion d'accès au médium avec *Qualité de Service*. Cependant, trois problèmes subsistent :

- En premier lieu, pour figurer dans la liste des nœuds interrogés, les stations doivent être associées au point d'accès. Or comme c'est le cas pour beaucoup d'autres technologies WLAN/WPAN, le mécanisme d'association ne peut être considéré comme déterministe car la demande d'association est envoyée dans la DCF par utilisation de CSMA/CA. Si le médium est alors surchargé, l'association sera impossible, même si le nœud voulant entrer dans le réseau a des informations critiques à envoyer.
- En deuxième lieu, les stations ayant souscrits à l'accès PCF ne sont pas pour autant certaines d'accéder au médium car le point d'accès peut différer l'interrogation d'une station si le temps restant avant la fin de la CFP n'est pas suffisant pour finaliser la transaction avec cette station. Ainsi, le mode d'accès PCF présente une trop forte caractéristique égalitaire dans la mesure où toutes les stations sont inlassablement interrogées à tour de rôle sans différenciation des besoins.
- Enfin, pour relancer la période PCF, le PC programme l'envoi d'une trame balise après chaque période de temps TBTT. Cependant, la trame balise ne peut être transmise que si le canal est détecté libre pour au moins une période de temps égale à PIFS. Selon l'état du canal radio à ce moment, un retard de la trame balise peut se produire lorsqu'une station en mode DCF vient de débiter une nouvelle transmission, ou n'a pas encore achevé sa transmission précédente. De ce fait, un phénomène d'écourtement de la période PCF apparaît, réduisant la durée de la période PCF prévue pour interroger les stations souscrites à l'accès PCF pour envoyer des données critiques (Ce phénomène est schématisé sur la figure III.9). Le temps de retard de la trame balise provoque aussi des conséquences sur les délais de livraison des messages qui pourront être envoyés durant le temps restant de la période PCF. Puisque la transmission de ces derniers a été déferée du temps d'écourtement, alors de fortes chances que leurs échéances respectives soient manquées.

Comme nous venons de le constater, même si le mode PCF du standard IEEE 802.11, n'est pas basé sur un algorithme aléatoire pour gérer les accès au canal sans fil, et prévoit la méthode du *polling* (interrogation) pour privilégier les stations ayant des trafics à contraintes temporelles. Les anomalies ci-dessus, que nous avons pu identifier et répertorier rendent le mode PCF incapable d'envisager de garanties fortes sur le plan temporel.

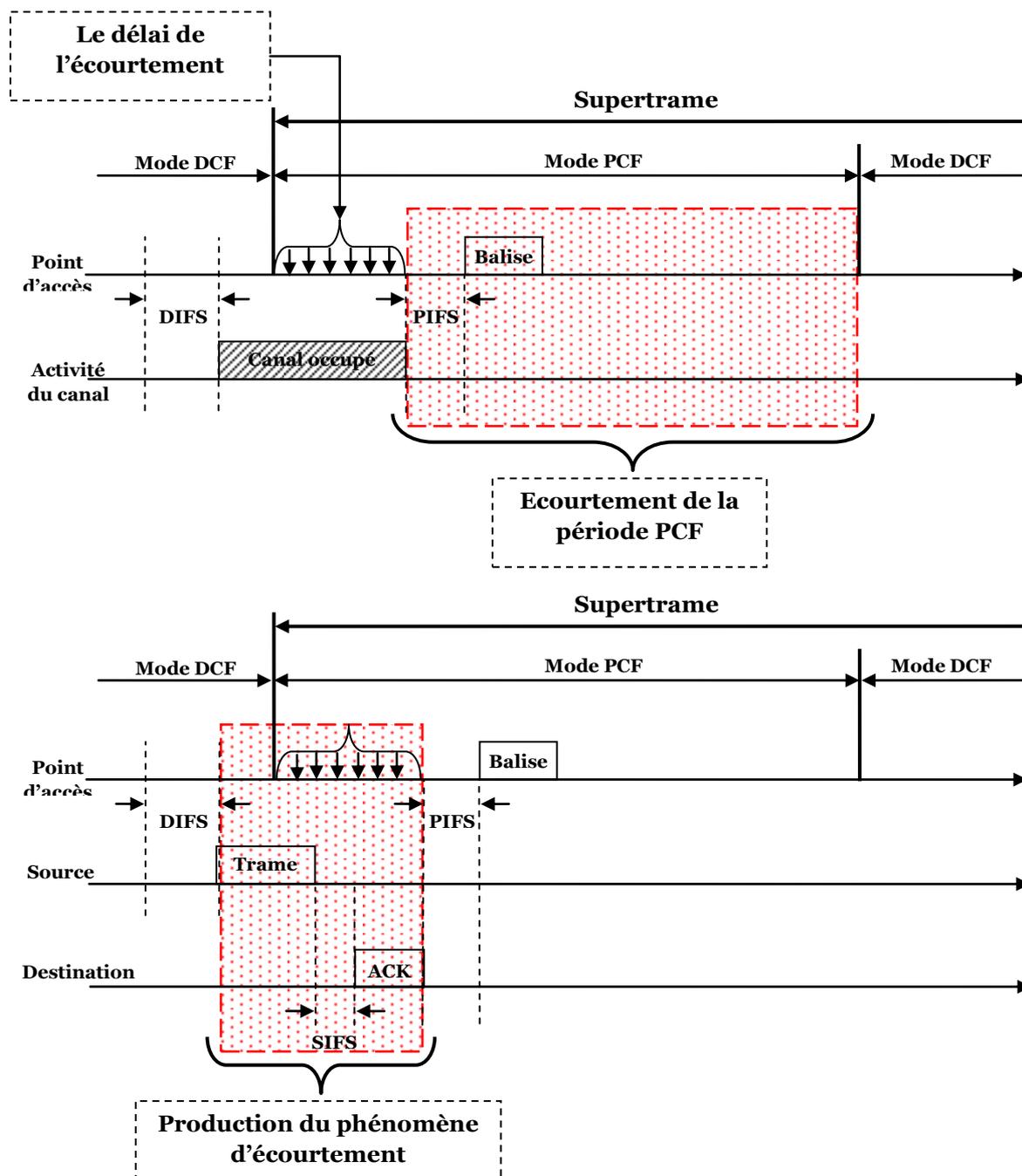


Figure III. 9 : Phénomène d'écourtement de la période PCF.

### **III.3.2.4. Limitation de la garantie temps réel dans l'IEEE 802.11**

Très rapidement, nous nous sommes accordés à dire que le standard IEEE 802.11 n'est pas capable de répondre aux besoins de garantie temps réel pour des applications à fortes contraintes temporelles. Deux raisons majeures ont mené à cette conclusion :

- Dans la fonction DCF, il n'y a aucun support de qualité de service. Tous les types de trafic sont transmis de façon similaire sous la règle du premier arrivé premier servi. Il n'y a aucune différenciation entre les flux et aucun privilège n'est attribué aux flux qui ont des contraintes de temps réel. Toutes les stations qui se trouvent dans la même cellule (BSS, *Basic Service Set*) sont en contention pour l'accès au canal avec la même priorité. De même, lorsque le nombre de stations dans une BSS augmente, la probabilité de collision devient de plus en plus importante, ce qui cause des retransmissions fréquentes. Tout cela conduit à des dégradations importantes de performances avec des pertes de la bande passante et une augmentation considérable des délais ; deux résultats qui rendent impossible la subsistance d'applications temps réel dans ce type de réseau.
- Malgré que la fonction PCF ait été conçue pour le transport de trafics ayant comme exigence des temps de service limités, plusieurs limitations y sont identifiées. Celles-ci incluent des délais imprévisibles de la trame balise et des durées de transmission des stations interrogées inconnues à priori. Le retard d'envoi de la trame balise est fonction de la longueur des MSDUs transmises dans la période précédente, de la fragmentation et du trafic offert. Ce retard conduit à un écourtement de la période PCF ainsi qu'un prolongement des délais de livraison des messages. L'écourtement de la période PCF réduit le nombre de messages qui peuvent être envoyés et leurs échéances peuvent être manquées car la transmission de ces messages a été reportée du temps de retard. Les durées imprévisibles de transmission des stations interrogées rendent très difficile au PC de prédire et de contrôler la planification des interrogations de toutes les stations pendant la CFP.

Conscients des limitations du standard IEEE 802.11 pour l'acheminement des trafics temps réel, plusieurs solutions [90] [91] [92] [93] [94] [95] [96] [97] [98] [99] [100] ont été proposées par la communauté de recherche afin de développer des solutions plus robustes pour la fourniture de la qualité de service dans le standard 802.11. Ces solutions vont constituer notre objectif dans la section suivante.

### **III.4. Amélioration de la QoS de la couche MAC IEEE 802.11**

Dans section, nous allons nous intéresser aux différentes solutions d'amélioration de la qualité de service proposées dans la littérature et intégrées au niveau de la couche MAC IEEE 802.11 pour prendre en charge les nouvelles applications nécessitant un certain niveau de qualité de service pour s'exécuter. Nous aborderons ces différentes solutions selon les deux approches de qualité de service à savoir la différenciation de service et la garantie de service. A l'issue de cette présentation, nous donnerons notre approche de contribution.

#### **III.4.1. Amélioration de la QoS par différenciation de services**

Dans ce paragraphe, nous allons aborder les principales solutions de différenciation de services (bande passante, délai, gigue) proposées pour améliorer la qualité de service de la couche MAC IEEE 802.11. Ces travaux orientés différenciation de service sont nombreux, mais dans l'ensemble sont basés sur la modification des différents paramètres d'accès au support sans fil pour favoriser certain(e)s stations/flux du réseau par rapport aux autres. Une classification à deux niveaux de ces solutions sera donnée, par la suite les principaux travaux seront listés selon cette dernière.

##### **III.4.1.1. Classification des approches de différenciation de services**

Dans la littérature, il existe plusieurs classifications des approches basées sur la différenciation de services : *approches distribuées* (améliorant la méthode DCF) ou *centralisées* (améliorant la méthode PCF), approches par station ou par flux. Les auteurs de la référence [88] proposent une classification à deux niveaux. Cette classification est présentée sur la figure III.10. Dans les paragraphes qui suivent, nous décrirons quelques unes de ces solutions.

### III.4.1.2. Approches de différenciation de service par stations

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques approches de différenciation de services par stations proposées pour la norme IEEE 802.11 afin d'améliorer la qualité de service. Ces solutions consistent entre autres à intervenir sur les paramètres de la couche MAC IEEE 802.11 (les délais inter-trames, les intervalles de backoff ... etc.) pour permettre à certaines stations d'être plus prioritaires que d'autres.

**Distributed Fair Scheduling (DFS)** : La méthode DFS effectue une différenciation basée sur l'intervalle de backoff. Avant chaque transmission, chaque station doit choisir aléatoirement un intervalle de backoff. Pour chaque classe de trafic est attribué un certain poids proportionnel à la bande passante nécessaire.

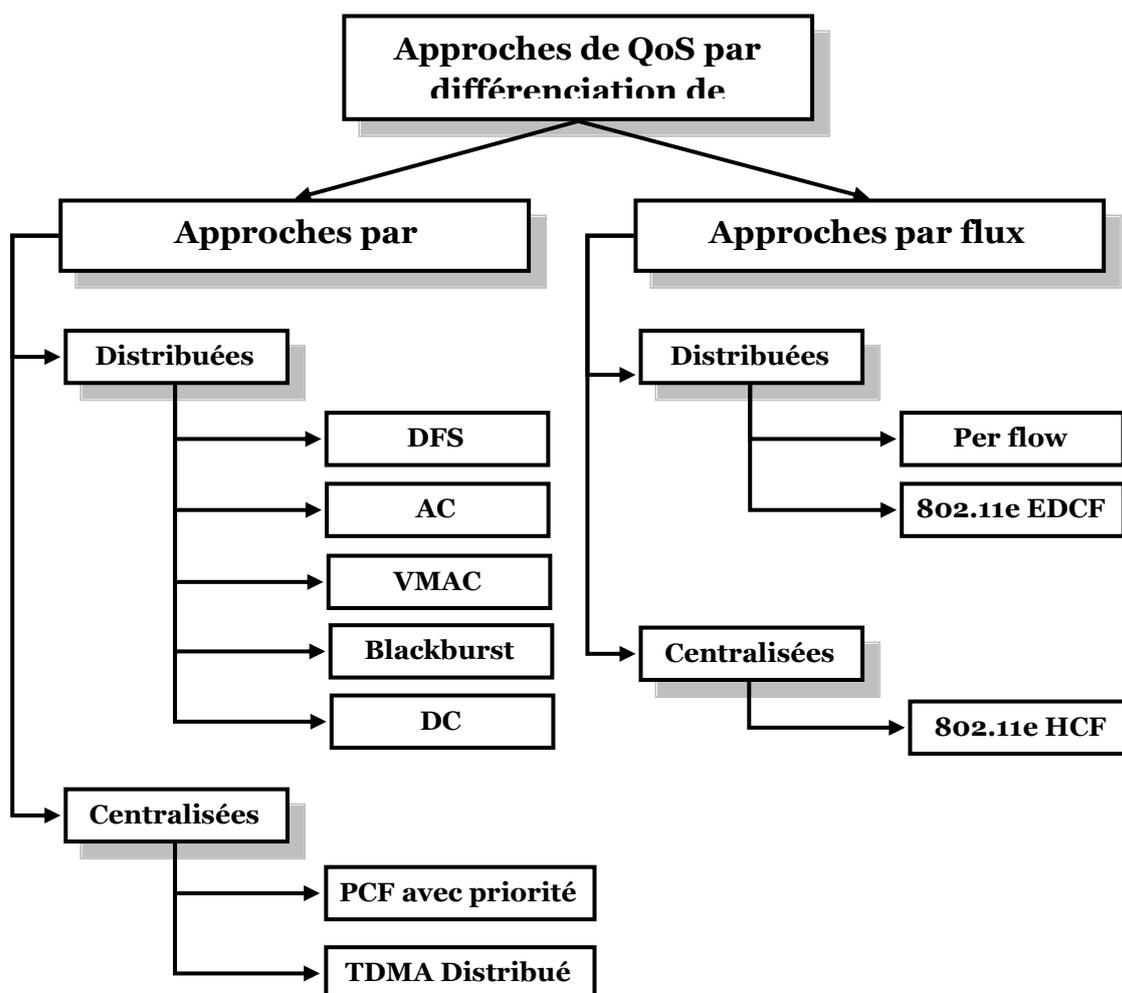


Figure III. 10 : Classification des approches par différenciation de service.

L'intervalle de backoff, affecté à chaque flux, est fonction de son poids et de la taille du paquet à envoyer. Ceci permet de partager équitablement la bande passante disponible [101]. Les stations qui transmettent en premier sont celles qui possèdent le plus petit intervalle de backoff. L'approche DFS est obtenue en modifiant la fonction de coordination distribuée du standard. Elle est basée sur la technique « d'attente partagée » connue sous le nom de SCFQ (*Self-Clocked Fair Queuing*). L'intervalle de backoff est calculé par la formule :

$$B = \left\lceil \rho \times \left[ \text{Facteur\_Echelle} \times \frac{\text{Taille}_{\text{paquet}}}{\emptyset} \right] \right\rceil$$

- Avec  $\emptyset$  : le poids de la station ;
- $\rho$  : une variable aléatoire uniformément distribuée dans l'intervalle [0.99, 1.1] ;
- Le paramètre *Facteur\_Echelle* est utilisé pour mettre à l'échelle les valeurs des intervalles de *backoff*. En cas de collision une nouvelle fenêtre de *backoff* est calculée en utilisant l'algorithme de *backoff* défini par le standard.

**VMAC (Virtual MAC) :** En se basant sur la méthode DCF, Campbell et Al [102] proposent deux nouveaux algorithmes MAC virtuel (VMAC) et source virtuelle (VS). VMAC observe passivement le canal radio et établit des estimations locales des délais, des gigue, des collisions et des pertes de paquets en prenant en compte les conditions locales et les interférences des cellules voisines. En utilisant les estimations de VMAC, VS ajuste les paramètres de l'application et détermine si une nouvelle session demandant un certain niveau de service peut être admise. Pour estimer la capacité libre du canal, on mesure le temps de libre après DIFS. VMAC et VS fonctionnent en parallèle avec l'application réelle et le protocole MAC du nœud concerné. Pour estimer le niveau de service. Ils émulent le comportement d'un trafic réel et son MAC en générant des paquets virtuels. Cependant, on ne transmet pas de données réellement. Les paquets sont estampillés et mis dans une mémoire tampon virtuelle. Ensuite les paquets sont mis en ordre pour être transmis sur le canal, après un certain *backoff*, comme si on utilisait un MAC réel. Cependant, au lieu de transmettre le paquet virtuel, le VMAC estime la probabilité de collision si ces paquets étaient envoyés. En cas de collision, VMAC double le *backoff* comme un MAC réel aurait fait. S'il n'y a pas de collision, VMAC estime le délai total et le surcoût.

Tous les autres aspects MAC (les retransmissions, l'incrémentation et la décrémentation des fenêtres de *backoff*, etc.) sont émulés. Les résultats de simulations obtenus avec ces algorithmes distribués montrent que leur utilisation pour le contrôle d'accès au canal radio permet le maintien d'un état globalement stable sans avoir à utiliser des méthodes centralisées pour la gestion des ressources radio. La différenciation des délais peut être assurée en augmentant l'écart entre les valeurs de  $CW_{min}$  affectées pour les hautes et faibles priorités. L'un des inconvénients de cette méthode est la complexité introduite par les interactions entre les couches MAC et la couche application.

**Approche AC (Aad et Castelluccia) :** Pour assurer une certaine différenciation de service offert à différents nœuds, Aad et Castelluccia [103] ont introduit une différenciation dans divers paramètres de la fonction de coordination distribuée du standard. Tout d'abord, des facteurs d'incrémentation du backoff différents sont utilisés pour chaque priorité. Après une éventuelle collision, une station sans fil  $i$  multiplie la taille de sa fenêtre de contention par un facteur d'incrémentation  $P_i$  au lieu de 2 (du standard). Quand  $P_i$  est grand, la fenêtre de contention de la station  $i$  est grande en moyenne. Par la suite elle a moins de chance d'accéder au canal. Les expérimentations montrent que cette différenciation fonctionne bien pour un flux UDP. Avec un flux TCP les performances de cette méthode sont faibles à cause des acquittements TCP qui possèdent la même priorité. Suite aux limitations de cette différenciation, les auteurs ont proposé une seconde méthode [104]. En effet, lorsque le nombre de terminaux en contention est faible et dans la mesure où la valeur  $CW$  est dans la plupart du temps égale à  $CW_{min}$ , l'idée est alors de faire un choix adéquat de cette valeur initiale ( $CW_{min}$ ) pour chaque classe de service afin d'apporter une différenciation de services entre ces classes. Cette proposition résout partiellement les problèmes de la méthode précédente. Une différenciation de services plus claire est obtenue pour les flux UDP lorsque le nombre de terminaux est petit. Cependant, ce mécanisme ne permet toujours pas d'obtenir une différenciation de services stricte pour les flux TCP. Des temps inter-trame DIFS différents sont aussi utilisés en fonction de chaque priorité. Des temps d'attente plus faibles sont attribués aux hautes priorités. L'inconvénient de cette différenciation est que les basses priorités vont souffrir tant que les hautes priorités ont des paquets à transmettre. Un autre type de différenciation est aussi utilisé par cette méthode : une différenciation par limitation

des tailles des paquets : on impose aux différentes priorités de transmettre des paquets de tailles différentes. Le débit utile obtenu par une priorité sera proportionnel à la taille de ses paquets. Deux types d'implémentation de cette différenciation sont possibles : rejeter les paquets dépassant la taille maximale allouée à une station ou bien fragmenter les paquets dépassant ce seuil maximal. Cela permet d'assurer à la fois la différenciation et la fiabilité des transmissions pour les différents types de flux. L'inconvénient de cette différenciation est qu'elle perd son efficacité dans les environnements bruités. Les paquets les plus longs, correspondant aux plus hautes priorités ont plus de chance d'être corrompus.

**Approche DC (Deng et Chang) :** Deng et Chang [105] proposent une approche de différenciation de services avec des modifications minimales de la méthode DCF du standard. La différenciation est assurée par deux paramètres de la couche MAC 802.11 : l'intervalle de Backoff et le temps inter-trame. Deux temps de backoff sont proposés. Chacun est combiné avec deux temps inter-trames différents PIFS et DIFS. Quatre classes de priorités sont alors obtenues. Avec cette méthode, les stations à hautes priorités doivent attendre un temps plus court pour accéder au canal (PIFS). Quand une collision a lieu, les stations à hautes priorités ont plus de chance d'accéder au canal en possédant des intervalles de backoff plus court. Cependant, quand il n'y a que des stations à faibles priorités voulant transmettre sur le canal, elles continuent quand même à utiliser de longs intervalles de backoff. Des délais plus longs sont alors observés lors de l'accès au canal.

**PCF avec priorité :** Les travaux de recherche s'intéressant à intégrer la différenciation de services au niveau de la méthode d'accès PCF sont peu nombreux vu que cette dernière est déjà facultative dans le standard IEEE 802.11. Cependant, une différenciation de service avec cette méthode peut être réalisée par utilisation de nouveaux critères lors de l'interrogation des stations sans fil. Une manière de réaliser cette différenciation de service, est d'associer des niveaux de priorités pour les stations sans fil. De cette façon, au lieu qu'un algorithme de scrutation de type Round Robin soit exécuté pour balayer équitablement les stations sans prise en considération de leurs besoins, un algorithme à priorité va être appliqué pour permettre à des stations qui possèdent des données critiques d'être plus prioritaires que d'autres.

### III.4.1.3. Approches de différenciation de services par flux

La norme IEEE 802.11e est la principale approche de différenciation de services par flux. Dans le but d'introduire une vraie qualité de service au niveau MAC, un groupe de discussion (TG11e) a été mis en place par l'IEEE. Ce groupe a proposé un amendement au standard de base IEEE 802.11 qui a été validé en juillet 2005. 802.11e prévoit deux mécanismes pour la gestion de la qualité de service dans 802.11 : Enhanced DCF et Hybrid CF [106].

#### ***Enhanced DCF (IEEE 802.11e)***

Enhanced DCF (EDCF), parfois désigné par Enhanced DCF Channel Access (EDCA) propose une amélioration de l'original DCF en introduisant huit classes de trafic. En interfaçant finement l'EDCF avec les couches supérieures, les trafics nécessitant des limites de latence et/ou de débits (vidéo, téléphonie) peuvent être rendus prioritaires. EDCF permet donc de réaliser une différenciation de services au niveau MAC. Pour la réaliser, le groupe de travail 802.11e propose d'une part d'intervenir sur les temps inter-frames et d'autre part sur plusieurs instances pour la gestion des fenêtres de contention (CW) :

- **Temps inter-frames** : SIFS, PIFS et DIFS sont conservés, mais une nouvelle durée inter-frame de valeur variable, proportionnelle à chaque classe et supérieure à DIFS est introduite : AIFS pour *Arbitration Inter Frame Space*.
- **Fenêtres de contention** : Nous avons vu plus haut que les fenêtres de contention aléatoires permettent de désynchroniser les accès au médium concurrents pour limiter le phénomène des collisions. Nous avons également vu que si une station ne remporte pas l'accès au médium, elle conserve sa valeur restante à courir de CW pour avoir plus de chance de le remporter à la tentative suivante. Avec le système de classe de trafics, 802.11e propose de gérer plusieurs instances de cette fenêtre de contention pour chaque trafic.

L'usage de ces deux nouvelles fonctionnalités permet de considérer jusqu'à huit stations virtuelles, au sein d'une même station « physique » ; chaque station virtuelle possède sa propre FIFO pour les données, son AIFS et sa propre instance de CW et chaque station virtuelle est gérée indépendamment des autres.

De plus, chaque niveau de priorité est associé à une valeur désignée par opportunité de transmission TXOP (*Transmit Opportunity*). TXOP définit un intervalle de temps pendant lequel une station peut conserver l'accès au médium et envoyer autant de trames qu'elle le souhaite. L'introduction de TXOP permet de mieux répartir les accès au médium; dans le cadre de 802.11 DCF, les stations nécessitant un accès bas débit étaient favorisées par rapport à celles nécessitant un haut débit.

EDCF permet donc d'introduire des niveaux de priorités (différenciation de services) au niveau MAC [107], un peu comme le permettait la méthode d'accès au médium EY-NPMA utilisée dans HiperLAN/1. Il permet donc à certains trafics d'être plus prioritaires que d'autres [108] ; en revanche, aucune garantie n'est possible et les trafics peuvent toujours entrer en collision.

### ***Hybrid CF (IEEE 802.11e)***

Hybrid CF (HCF), parfois désigné par Hybrid CF Channel Access (HCCA) propose une gestion de l'accès au médium orientée déterminisme qui améliore le PCF initial de 802.11 en le rendant plus souple. Le problème majeur du PCF est que les dernières stations interrogées par le point d'accès pouvaient voir leur interrogation différée à la supertrame suivante. Avec 802.11 PCF, la limite entre zone sans contention (CFP) et zone avec contention (CP) est fixée d'avance par le Point de Coordination (le point d'accès) et annoncée dans le *beacon*, alors que la durée d'interrogation des stations est variable ; de ce fait, si les premières stations interrogées utilisent copieusement le médium, il ne restera pas assez de temps pour les dernières et l'accès au médium leur sera différé.

Dans le cadre de 802.11e HCF, cette limite entre CFP et CP est variable, le Point de Coordination pouvant décider de « rajouter du temps » à la CFP pour permettre l'interrogation de toutes les stations.

### ***Autres améliorations***

802.11e propose quelques améliorations supplémentaires évoquées ici à titre indicatif :

**Automatic Power Save Delivery (APSD)** est une amélioration significative de la gestion énergétique dans 802.11. Il permet à un point d'accès de tamponner les

données à destination d'un nœud endormi jusqu'à ce que ce nœud signale son réveil en transmettant une trame de données. Dès que le point d'accès reçoit la trame, il renvoie les données en attente. APSD est efficace si la bande passante utilisée est symétrique, ce qui est le cas des applications de téléphonie IP pour lesquelles il a été conçu.

**Block Acknowledgments (BA)** permet au destinataire d'acquitter toutes les trames d'un TXOP par un seul acquittement. BA permet la réduction de l'*overhead* provoqué par des acquittements multiples.

**No Acknowledgments (NoAck)** permet la mise en place de classes de services avec lesquels les messages transmis ne sont pas acquittés. Cette amélioration permet d'éviter la retransmission inutile de données à haute criticité temporelle.

**Direct Link Setup (DLS)**, ou Direct Link Protocol (DLP) permet l'envoi direct de données de station à station d'un même BSS ; cette fonctionnalité permet en fait l'envoi de messages dans un pseudo mode ad hoc, c'est-à-dire sans passer par le point d'accès, ce qui permet de multiplier par près de deux la bande passante dans le cas d'un transfert de station à station.

### **III.4.2. Amélioration de la QoS par garantie de service**

Les approches de garantie de service pour l'amélioration de la qualité de service dans les réseaux IEEE 802.11 ont été proposées dans plusieurs travaux de recherches. Voyant que les améliorations apportées par le standard IEEE 802.11e ne permettent pas d'éviter la saturation du canal ou de définir une méthode de partage de la bande passante. Dans la suite de ce paragraphe, nous présenterons les principaux travaux de garantie de service.

**Gallardo et Al** [109] : proposent un nouvel algorithme pour le contrôle d'accès au medium sans fil. L'objectif de cet algorithme est d'offrir des garanties réelles de qualité de service pour les utilisateurs du réseau 802.11. L'exécution de cet algorithme permet de fournir une décision sur la possibilité ou non d'accepter un nouveau trafic de paquets sans violer les garanties de qualité de service nécessaires aux trafics déjà acceptés. Dans l'approche proposée, la réservation des ressources est implicite. Les simulations effectuées avec OPNET pour l'évaluation de cette approche montrent des performances acceptables. Ses performances sont largement meilleures (en équité

dans le partage des ressources et en robustesse) en comparaison à d'autres algorithmes de contrôle d'accès tels que l'algorithme WFQ (Weighted Fair Queuing).

**Hegde et Al** [110] : proposent une nouvelle solution centralisée WM (Wireless Manager) pour la gestion des réseaux locaux sans fil. Cette solution apportée au niveau MAC, permet d'améliorer la qualité de service perçue par les utilisateurs d'un réseau IEEE 802.11b/e. Plusieurs algorithmes sont alors implémentés au niveau du WM pour assurer les objectifs de QoS désirés. L'adaptation dynamique des poids de l'algorithme d'ordonnement WFQ permet une meilleure équité et utilisation du canal. Une méthode pour l'estimation des débits entre stations et points d'accès avec des mesures de Ping périodiques a été proposée. Un algorithme de contrôle d'accès au medium permet une différenciation de services pour la même catégorie d'accès (AC) IEEE 802.11e. Les auteurs ont aussi proposé un mécanisme de bufférisation pour minimiser les coupures lors d'une application de voix et réduire la dégradation des performances de TCP due aux délais introduit par les handovers. Les simulations et la plateforme d'émulation montrent que les objectifs fixés ont été atteints. Cette approche peut être améliorée pour des scénarios plus complexes.

**Li et Prabhakaran** [111] : présentent une nouvelle méthode de gestion de qualité de service au niveau MAC pour le contrôle d'admission et la réallocation des ressources. Cette méthode permet d'apporter un support de qualité de service pour les applications temps réel en environnements sans fil. Les auteurs s'intéressent à l'ordonnement des priorités au niveau MAC avec lequel les utilisateurs peuvent s'offrir un niveau de service approprié. En s'échangeant des informations sur l'état du medium sans fils telles que la bande passante disponible ou les délais moyens entre des stations voisines, les utilisateurs du réseau sans fil peuvent assurer un contrôle d'admission basé sur l'état réel du réseau et modifier leurs niveaux de priorités. Cette approche distribuée nécessite une coordination au niveau MAC entre l'ensemble des utilisateurs. Des pénalités, telles que l'allocation des plus faibles priorités, doivent être appliquées aux utilisateurs ne respectant pas les mécanismes proposés. Des simulations ont été effectuées en utilisant l'outil de simulation NS. Les résultats montrent que ce cadre proposé permet effectivement une coordination entre l'ensemble des utilisateurs sans fil pour garantir les débits en réservant les ressources nécessaires et en allouant les priorités MAC adéquates.

**Korakis et Tassiliulas** [46]: proposent un algorithme d'ordonnement pour la garantie de la qualité de service compatible avec les spécifications IEEE 802.11. Cet algorithme opère au niveau du point d'accès et consiste à mesurer et contrôler les paramètres de l'entête 802.11e pour le contrôle d'accès durant la période HCF. Cette technique prend en considération l'état du canal radio du moment que des informations sur l'état de ce canal peuvent être obtenues suite aux modifications apportées par le groupe de travail h du standard 802.11. Les simulations effectuées par les auteurs pour l'évaluation de l'approche montrent des performances meilleures par rapport aux techniques ne prenant pas en considération l'état du canal.

**Lee et Al** [37] : proposent une nouvelle amélioration de la méthode d'accès EDCA du standard 802.11e nommée DS-EDCA (Differentiated Service-EDCA). Un service de priorité est garanti aux trafics à hautes priorités en configurant correctement les paramètres des trafics à faibles priorités. Le service d'équité est assuré en utilisant la technique d'ordonnement DFS. Les auteurs proposent un modèle de partage hiérarchique du canal radio dans lequel des ressources plus importante du canal sont allouées aux points d'accès. Les simulations effectuées avec NS montrent que la méthode DS-EDCA est plus performante que la méthode EDCA et reste toujours facile à implémenter et compatible avec le standard IEEE 802.11.

### **III.4.3. Critique globale et notre approche de contribution**

Dans les deux paragraphes précédents, nous avons présenté un panorama de solutions à qualité de service, proposées dans la littérature afin d'offrir un support de qualité de service au niveau de la couche contrôle d'accès au médium de la norme IEEE 802.11, pour satisfaire les besoins des applications exigeant un certain niveau de qualité de service pour s'exécuter. A travers les propositions qui ont été présentées, nous avons pu constater que ces dernières sont orientées soit différenciation de service entre stations/flux du réseau, soit garantie de service.

Les propositions à qualité de service par différenciation de service consistent dans la plupart des cas à intervenir sur les paramètres de la couche MAC IEEE 802.11 (les délais IFS, les durées d'attente Backoff ...) pour permettre à certain(e)s stations/flux d'être plus prioritaires que d'autres. Certes, ces amendements de la norme originelle IEEE 802.11, ont permis de contribuer fortement au niveau de la couche MAC IEEE 802.11, d'apporter des solutions géniales pour régler énormément

de problèmes de communications entre les entités constituant le réseau, et ainsi de rendre possible dans un environnement sans fil le déploiement d'applications nécessitant un certain niveau de qualité de service. Malheureusement, dans le cadre de notre étude de la norme IEEE 802.11 en vue d'une adaptation protocolaire pour les applications temps réel, à caractère strict, issues du monde de l'automatique, ces solutions ne sont pas envisageables car elles visent des applications non critiques de transport audiovisuel. Les travaux sur la garantie de service au niveau MAC IEEE 802.11 sont moins nombreux, les solutions proposées dans la littérature sont basées généralement sur des approches centralisées (Mécanismes de contrôle d'admission, Algorithmes d'ordonnancement ...) et des techniques de réservation de ressources pour garantir la qualité de service exigée par l'application. Ce qui est de la garantie d'un délai d'accès borné au canal, pour les applications temps réel, la solution privilégiée consiste à remplacer la méthode d'accès CSMA/CA du protocole IEEE 802.11 par un accès déterministe.

Dans le cadre de ce projet de Magister, comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, nous chercherons à proposer des adaptations protocolaires à la couche MAC de la norme originelle IEEE 802.11 pour supporter les contraintes des applications temps réel issues du monde de l'automatique. Notre contribution devra fournir des garanties strictes quant à la livraison des messages temps réel dans des délais bornés supérieurement au pire des cas et pour les messages ne présentant aucune spécificité temporelle, notre solution devra fournir le meilleur effort.

Les applications temps réel sont nombreuses et variables, et le protocole MAC qui devrait gérer les accès au canal afin de satisfaire les exigences de l'application temps réel doit être spécifié, conçu et implémenté selon la nature du trafic généré par l'application et le type de mobilité exhibé par les entités intervenant dans l'exécution de l'application. Dans le cadre de notre étude sur la proposition d'une méthode d'accès au médium, nous allons nous intéresser aux applications de Contrôle-Commande industrielles en vue de proposer un protocole MAC qui puisse prendre en considération les caractéristiques de cette catégorie d'applications critique en temps et satisfaire par conséquent leurs exigences. Notre démarche consistera à démarrer de l'application temps réel, c'est-à-dire étudier la nature du trafic généré par l'application et donner une classification de ce dernier selon les caractéristiques temporelles de ce trafic à savoir la périodicité et la criticité. Le trafic temps réel

généralisé par une application temps réel hérite des caractéristiques temporelles des tâches temps réel constituant l'application. Selon la périodicité, les tâches temps réel sont classifiées en tâches périodiques, apériodiques, cycliques ou acycliques. Selon la criticité, on en trouve des tâches à contraintes strictes (dures ou critiques) et des tâches à contraintes souples (moues ou non critiques). Les tâches temps réel d'une application temps réel sont généralement distribuées sur des sites différents et communiquent par envoi/réception de messages via réseau. Les messages transférés sur le réseau est une conséquence de l'exécution des tâches temps réel. Donc, ces messages héritent les mêmes caractéristiques temporelles des tâches qu'ils les ont générés. Notre objectif, dans un premier temps est de combiner les deux notions de périodicité et de criticité du trafic temps réel et de donner une nouvelle classification du trafic temps réel selon ces deux critères fondamentaux et primordiaux. Par la suite, selon l'application, dans notre cas nous nous intéresserons aux applications de contrôle-commande industrielles, nous allons sélectionner les classes de trafic à garder parmi toutes les combinaisons possibles déjà trouvées. La seconde étape, consistera à étudier le comportement de mobilité exhibés par les entités intervenant dans l'application, à savoir station sans fil sans mobilité, mobilité intra-cellule et mobilité inter-cellule. L'objectif de l'étude du type de mobilité des stations est de trouver des relations entre les classes de trafic générées par la station sans fil et le type de sa mobilité. Une fois ceci est fait, l'étape suivante consistera à dégager les contraintes de chacune des classes de trafic et nous finirons par proposer des techniques d'accès adéquates pour répondre à ces exigences.

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à réaliser une étude des protocoles MAC des réseaux WLANs en général et ceux de la norme IEEE 802.11 en particulier. Nous avons abordé ce chapitre par des préliminaires sur le contrôle d'accès au médium et de la qualité de service dans les réseaux. Ces notions fondamentales sont primordiales pour comprendre et appréhender la diversité des techniques d'accès au médium et les approches de qualité de service introduites au niveau de la couche MAC des réseaux WLANs.

A travers ce chapitre nous avons accordé un grand intérêt à identifier sur le plan temporel les imperfections des normes des réseaux locaux sans fil (HiperLAN et IEEE 802.11). Nous avons constaté que ces normes ne peuvent cependant être utilisées dans un contexte où les contraintes de temps sont fortes ; car les protocoles MAC utilisés dans ces dernières, sont basés généralement sur des algorithmes aléatoires (non déterministes) qui ne règlent pas de manière déterministe les problèmes de collisions.

La plupart des propositions de qualité de service intégrées au niveau MAC IEEE 802.11, concerne des applications non critiques de type audiovisuel et ce qui est du temps réel dur, ces propositions restent encore insuffisantes. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter notre proposition de protocole MAC temps réel. Son évaluation par simulation permettra de le valiser sur le plan temporel.

# Chapitre 4

---

## **Proposition, Evaluation de performances et validation d'un protocole MAC temps réel (RT-MAC)**

---

### **IV.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons proposer un protocole MAC temps réel (RT-MAC) destiné pour une utilisation en environnement industriel où les contraintes de temps sont fortes (section IV.2). L'évaluation de performances de ce protocole et sa validation par rapport aux exigences des applications industrielles caractérisées par des contraintes de temps critiques, va constituer notre second objectif dans la section IV.3.

## **IV.2. Proposition d'un protocole MAC Temps réel (RT-MAC)**

Cette section sera consacrée à la présentation de notre protocole RT-MAC destiné aux applications industrielles temps réel de type contrôle-commande d'un procédé de production.

### **IV.2.1. Présentation générale du protocole RT-MAC**

A travers ce paragraphe, nous tenons à bien identifier et clarifier nos objectifs concernant la proposition de notre protocole MAC temps réel **RT-MAC** (pour, *Real Time-Medium Access Control*), et à bien tracer l'itinéraire explicitant les différentes étapes à entreprendre lors de la conception de ce dernier. Ces étapes définiront la démarche que nous adopterons tout au long de la présentation de notre protocole MAC temps réel. Avant de commencer, nous avons jugé utile de rappeler l'origine de notre travail c'est-à-dire, la motivation ou la raison pour laquelle nous souhaitons proposer le protocole RT-MAC, comme support de contrôle d'accès au médium, au niveau couche liaison de données, pour les applications à fortes contraintes temporelles, en environnement industriel sans fil. A l'issue, les grandes lignes de notre proposition de protocole RT-MAC seront abordées, en mettant en exergue leurs principales spécificités. Nous terminerons ce paragraphe par la mise en lumière de l'originalité des adaptations protocolaires que nous souhaiterons apporter à l'architecture MAC actuelle de l'IEEE 802.11, afin de développer au niveau contrôle d'accès au médium, des aptitudes temps réel qui feront de l'IEEE 802.11 une norme envisageable au dessous des applications industrielles temps réel de type contrôle-commande d'un procédé de production.

Dans l'optique d'intégrer la technologie de communication sans fil IEEE 802.11 (l'unique norme répandue dans les réseaux locaux sans fil) dans les systèmes automatiques, notre proposition est venue apporter un certain nombre d'adaptations protocolaires à la norme originelle IEEE 802.11 afin de rendre possible dans un environnement sans fil le déploiement d'applications temps réel distribuées issues du domaine de l'automatique. Ces applications pourront ainsi bénéficier des avantages que permettent les technologies de communications sans fil (mobilité, flexibilité et réduction du coût de câblage), tout en leur garantissant les mêmes conditions de fonctionnement que celles offertes par les technologies filaires existantes (dans notre travail, des garanties seront assurées au niveau couche liaisons de données).

Dans le cadre de notre proposition de méthode d'accès, nous nous intéresserons aux applications industrielles de type Contrôle-Commande d'un procédé de production, pour lesquelles nous allons adapter la sous couche MAC de la norme IEEE 802.11, de telle manière à satisfaire les contraintes temporelles de cette catégorie d'applications. Les applications de contrôle-Commande industrielles sont considérées parmi les applications du domaine de l'automatique, qui sont caractérisées par des contraintes temporelles fortes ; nous parlons d'ailleurs du temps réel critique, dur ou strict ; car le non respect de ces contraintes temporelles provoque un dysfonctionnement du système d'automatisation et par conséquent un arrêt total de la chaîne de production. Les caractéristiques temporelles des applications industrielles contrôle-commande sont donc considérées parmi les premières spécificités à prendre en compte lors de la conception du réseau industriel (la couche PHY et MAC en particulier) dont le rôle est d'interconnecter les différentes entités qui interviennent lors de l'exécution de l'application.

Dans ce projet de Magister, nous allons nous intéresser à la couche d'accès au médium (MAC) sous l'hypothèse qu'au niveau couche physique (PHY) les communications sont fiables. Autrement dit, nous allons tenter de fiabiliser les communications au niveau MAC pour lesquelles la transmission au niveau physique peut se dérouler avec succès. Le protocole MAC gère les communications entre les différentes entités faisant partie du réseau et à lui la charge de garantir la justesse temporelle des résultats que communiquent les différentes tâches qui participent à l'exécution de l'application temps réel. Ces résultats sont enveloppés dans des messages et sont envoyés via réseau. Les tâches temps réel d'une application industrielle sont géographiquement distribuées sur des sites différents et communiquent via réseau par envoi/réception de messages. La cohérence globale des applications industrielles temps réel est alors conditionnée par la satisfaction des contraintes temporelles de chacun des messages générés lors de l'exécution des tâches temps réel.

Pour atteindre notre objectif, qui consiste à rendre faisable le déploiement d'un réseau sans fil IEEE 802.11 dans un environnement industriel, précisément pour interconnecter les éléments d'un système de pilotage d'un processus de production (Automates, Capteurs, Actionneurs, ou autres éléments susceptibles d'être utilisés) qui interviennent pour exécuter l'application temps réel Contrôle-Commande, nous

allons apporter un certain nombre d'adaptations protocolaires à l'architecture MAC actuelle de la norme originelle IEEE 802.11, qui stipulent entre autres à :

- Proposer une approche de classification MAC du trafic temps réel ;
- Proposer une méthode de gestion des files d'attente de messages contraints et non contraints temporellement (tamponnement et ordonnancement local des trames de données) ;
- Proposer une technique MAC hybride qui offre à la fois le déterminisme et la priorité pour le trafic temps réel et pour le trafic non temps réel, un accès égalitaire et l'évitement de famine.
- Adoption et adaptation du mode centralisé d'IEEE 802.11 pour l'environnement industriel ;
- Proposition d'une méthode d'organisation des canaux de communication et d'orchestration des accès au canal sans fil entre les différentes classes de trafic temps réel.

Dans notre démarche de proposition du protocole RT-MAC pour les applications industrielles temps réel, nous avons eu comme idée de commencer par bien décortiquer cette notion de temps réel des tâches composant l'application temps réel. L'objectif étant d'en tirer les différentes caractéristiques temporelles des tâches temps réel, d'en établir par la suite les différentes combinaisons possibles de cette variété de caractéristiques temporelles et de les projeter sur les messages qui en résultent de l'exécution de l'application temps réel. En utilisant ces caractéristiques temporelles, nous définirons une nouvelle classification du trafic temps réel.

D'autre part, la mobilité des stations sans fil en milieu industriel et la topologie du réseau sous-jacent est un autre point qui a suscité notre attention. Contrairement à d'autres contextes d'utilisation des réseaux sans fil en général et mobile en particulier, la topologie d'un réseau industriel sans fil et le comportement de mobilité des stations sans fil sont prédictibles. Dans un environnement de production, les stations sans fil sont caractérisées par une faible mobilité et par conséquent la topologie du réseau est quasi-statique. De notre point de vue, l'étude sur la mobilité des stations sans fil d'un réseau industriel simplifiera davantage la gestion des communications temps réel avec notre protocole RT-MAC. En effet, en étudiant la mobilité des stations sans fil, nous pourrions remarquer des relations entre les classes de trafic temps réel et le type de mobilité des stations sans fil.

Les prochains paragraphes seront consacrés à la description en détails de notre proposition de protocole MAC temps réel RT-MAC. Nous allons aborder et expliquer chacune des adaptations protocolaires que nous avons citées au préalable. Comme nous l'avons mentionné, notre protocole RT-MAC modifiera, intégrera et proposera des mécanismes, dont l'objectif principal est de combler toutes les lacunes, des protocoles MAC IEEE 802.11 identifiées dans le chapitre III, pour offrir un support de communication capable de gérer efficacement les accès au médium sans fil et de répondre sur mesure aux demandes des applications industrielles.

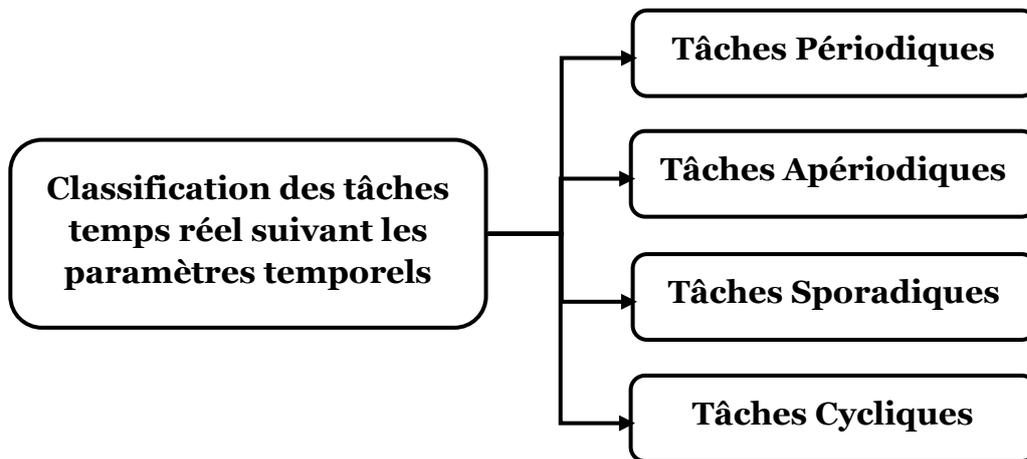
#### **IV.2.2. Proposition d'une approche de classification MAC du trafic temps réel**

Ce paragraphe constitue le point de départ de notre démarche pour la proposition du protocole *RT-MAC*. Ce protocole est orienté utilisation industrielle, en particulier pour les applications temps réel à caractère strict (dur ou critique) de type contrôle-commande du processus de fabrication. Notre proposition peut aussi être généralisée pour tout genre d'applications temps réel générant un trafic qui peut être considéré parmi les classes de trafics que nous allons dégager tout au long de ce paragraphe et dont les entités exécutant cette catégorie d'applications temps réel, exhibent le même comportement de mobilité que celui des stations faisant partie d'un réseau industriel et servant à contrôler et à commander un processus de fabrication.

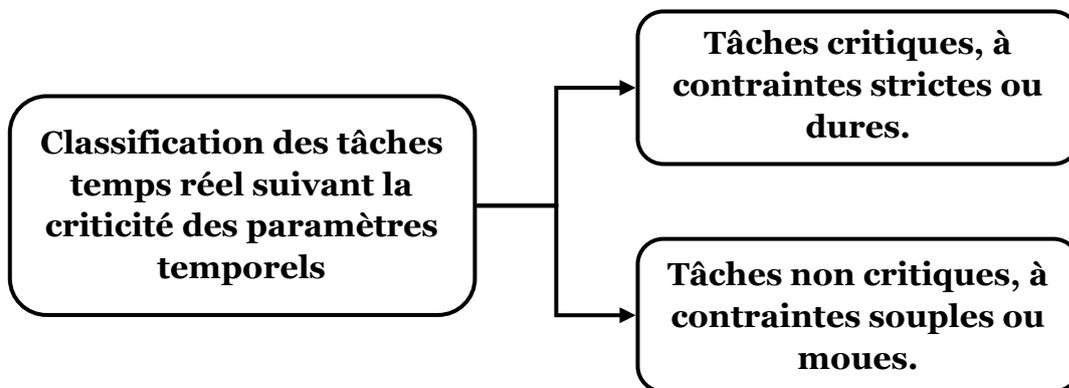
Les applications temps réel, contrairement à d'autres types d'applications, sont considérées dans la catégorie d'applications réactives. Cette spécificité de réactivité des applications temps réel, suggère les deux paradigmes du temps réel qui sont l'interactivité et le temps. L'interactivité d'une application temps réel, signifie que son fonctionnement est assujéti par l'évolution de l'environnement qui lui est connecté et dont elle doit contrôler le comportement. Alors que le paradigme temps, signifie que le bon fonctionnement des applications temps réel dépend non seulement de la correction algorithmique et logique, mais aussi de la correction temporelle des dates d'arrivée des mesures à partir du procédé et des instants d'applications de la commande sur ce dernier.

Le paradigme temps est le critère que nous avons choisi pour donner une classification du trafic temps réel au niveau de la sous couche MAC IEEE 802.11. Notre idée, est à l'origine d'une constatation que nous avons faite sur la possibilité de

projeter les paramètres temporels des tâches temps réel et les contraintes qu'engendrent ces derniers sur le trafic temps réel générés par l'exécution des tâches temps réel. En revanche, une application temps réel est constituée d'un ensemble de tâches temps réel qui sont géographiquement distribuées sur des sites distants. Ces tâches communiquent alors via réseau, par envoi/réception de messages. Les messages temps réel sont alors, une conséquence de l'exécution des tâches temps réel. Suivant le paradigme temps, les tâches temps réel peuvent être classifiées selon leurs paramètres temporels en quatre types de tâches : tâches périodiques, apériodiques, sporadiques et cycliques (voir Figure IV.1) et suivant la criticité des contraintes qu'engendrent ces paramètres temporels, les tâches temps réel sont alors classifiées en deux types de tâches : tâches critiques, à contraintes strictes ou dures, et tâches non critiques, à contraintes souples ou moues (voir Figure IV.2).



**Figure IV. 1 :** Types de tâches temps réel suivant leurs paramètres temporels.



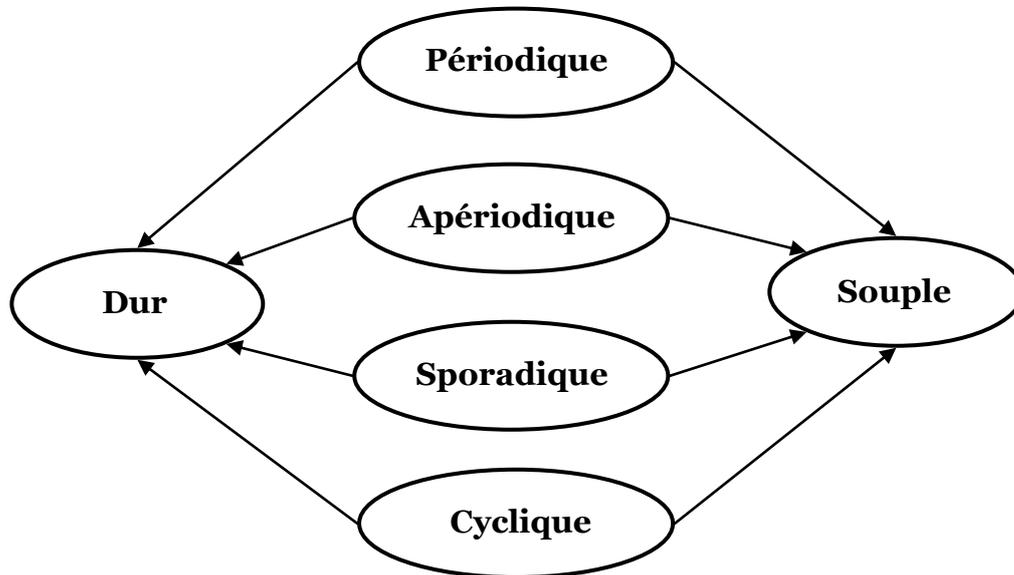
**Figure IV. 2:** Types de tâches temps réel suivant la criticité des paramètres temporels.

Pour pouvoir proposer une nouvelle classification du trafic temps réel au niveau de la sous couche MAC IEEE 802.11, nous avons utilisé les caractéristiques et les contraintes temporelles des tâches temps réel comme critères de classification des messages temps réel. Du fait que les messages temps réel résultent de l'exécution des tâches temps réel, la classification des tâches temps réel présentées précédemment, est applicable sur les messages temps réel. Donc les messages qui transitent via un réseau industriel temps réel, peuvent alors être, selon leurs paramètres temporels, périodiques, apériodiques, sporadiques ou cycliques et selon la criticité qu'engendrent ces paramètres temporels, nous pouvons retrouver des messages critiques (à contraintes strictes ou dures) et des messages non critiques (à contraintes souples ou moues).

Dans notre proposition d'une classification du trafic temps réel, nous ne nous contentons pas seulement de projeter les caractéristiques et les contraintes temporelles des tâches temps réel sur les messages temps réel; car cette manière de classification du trafic temps réel, qui considère séparément les paramètres temporels et leurs contraintes sur les messages temps réel, peut ne pas être utile; dans le sens où aucune implémentation ne peut être envisagée dans la pratique. C'est pour cette raison, que nous avons choisi de proposer une classification qui considèrera ensemble les paramètres temporels et leurs contraintes associées, en établissant toutes les combinaisons possibles qui peuvent être construites à partir de ces deux critères. Le tableau IV.1, résume les différentes classes de trafic temps réel qui peuvent être dégagées à partir des caractéristiques et des contraintes temporelles assignées aux messages temps réel (voir Figure IV.3).

Selon les paramètres temporels du trafic temps réel et le niveau de criticité qu'engendrent ces derniers, nous avons pu dégager huit classes de trafic temps réel (les différentes classes de trafic temps réel et leurs abréviations sont répertoriées dans le tableau IV.1). De toute évidence, l'ensemble de ces classes de trafic temps réel, ne peut être tout implémenté au niveau de la couche d'accès MAC IEEE 802.11. Car, d'une part, leurs implémentations requièrent des ressources non négligeables pour le stockage (mémoire tampon) et pour le traitement (temps d'exécution processeur) et d'autre part, quelques unes de ces classes de trafic temps réel, peuvent être considérées comme des sous-classes dans d'autres classes de trafic temps réel. Pour toutes ces raisons, nous nous sommes retrouvés devant le fait de devoir réduire au

maximum ces différentes classes de trafic temps réel et de ne laisser que le strict minimum.



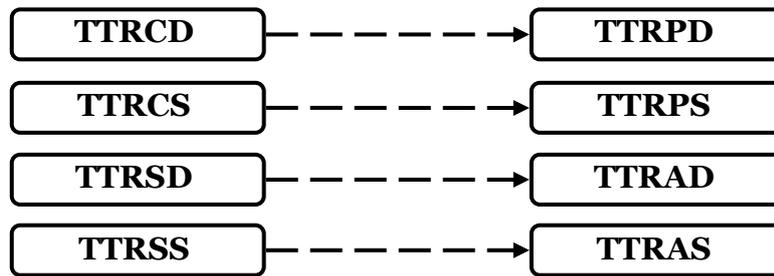
**Figure IV. 3 :** Association des paramètres temporels à leurs contraintes.

<b>Classes de trafic temps réel</b>	<b>Abréviation</b>
Trafic Temps Réel Périodique à contraintes Dures	<b>TTRPD</b>
Trafic Temps Réel Périodique à contraintes Souples	<b>TTRPS</b>
Trafic Temps Réel Apériodique à contraintes Dures	<b>TTRAD</b>
Trafic Temps Réel Apériodique à contraintes Souples	<b>TTRAS</b>
Trafic Temps Réel Sporadique à contraintes Dures	<b>TTRSD</b>
Trafic Temps Réel Sporadique à contraintes Souples	<b>TTRSS</b>
Trafic Temps Réel Cyclique à contraintes Dures	<b>TTRCD</b>
Trafic Temps Réel Cyclique à contraintes Souples	<b>TTRCS</b>

**Tableau IV. 1 :** Classes de trafic temps réel selon les caractéristiques et les contraintes temporelles.

Pour commencer les réductions des classes de trafic temps réel, nous proposons d'effectuer une première selon les paramètres temporels (cyclique/ périodique et sporadique/apériodique). Comme nous l'avons vu au chapitre I

(paragraphe I.2.2), les tâches temps réel cycliques et sporadiques sont considérées comme des sous familles de tâches temps réel périodiques et apériodiques respectivement. Cette propriété d'appartenance des tâches temps réel selon les paramètres temporels est valable pour le trafic temps réel, et son application réduira les classes de trafic temps réel de moitié. La figure IV.4, montre les réductions que nous avons effectuées selon les paramètres temporels et le tableau VI.2, récapitule les classes de trafic que nous avons gardées.



**Figure IV. 4 :** Réduction des classes de trafic temps réel selon les paramètres temporels.

<b>Classes de trafic temps réel</b>	<b>Abréviation</b>
Trafic Temps Réel Périodique à contraintes Dures	<b>TTRPD</b>
Trafic Temps Réel Périodique à contraintes Souples	<b>TTRPS</b>
Trafic Temps Réel Apériodique à contraintes Dures	<b>TTRAD</b>
Trafic Temps Réel Apériodique à contraintes Souples	<b>TTRAS</b>

**Tableau IV. 2 :** Classes de trafic retenues après la première réduction selon les familles et sous familles des paramètres temporels

Nous proposons une deuxième réduction des classes du trafic temps réel, indiquées dans le tableau IV.2 selon les paramètres temporels, mais en se basant dans notre justification sur la criticité des contraintes qu'engendrent ces paramètres. Sous l'hypothèse de pouvoir connaître la période minimum pour la classe TTRAD (Trafic Temps Réel Apériodique à contraintes Dures), nous pouvons la considérer comme une sous classe de TTRPD (Trafic Temps Réel Périodique à contraintes

Dures). Cette réduction, nous semble nécessaire du fait de la difficulté d'implémenter la classe TTRAD. En effet, cette dernière rassemble à la fois deux spécificités difficilement contrôlables. La première est la non prédictibilité du trafic (les dates d'arrivées ne sont pas connues à l'avance) et la deuxième, concerne le degré de criticité de cette classe de trafic ; du fait qu'il n'est pas aisé de satisfaire les contraintes temporelles d'un trafic dont les paramètres temporels ne sont pas définis au préalable. Pour ces raisons, nous avons décidé de considérer la classe TTRAD comme TTRPD.

Une troisième et dernière réduction, concerne la classe TTRPS (Trafic Temps Réel Périodique à contraintes Souples). Nous proposons de l'éliminer du fait de l'inexistence d'une implémentation en pratique (le trafic à contraintes souples est généralement considéré apériodique).

D'une manière générale, les messages venant de l'application et soumis au service MAC peuvent être classés soit comme des messages temps réel (TTRPD ou TTRAS), soit comme des messages non temps réel (pas de contraintes associées au transfert). En effet, pour cette dernière catégorie, on peut toujours admettre qu'un réseau, qui doit principalement transmettre du trafic temps réel, a également à transmettre du trafic non contraint temporellement. Le tableau IV.3 résume les classes de trafic que nous implémenterons dans notre protocole RT-MAC.

<b>Classes de trafic temps réel</b>	<b>Abréviation</b>
<b>Trafic Temps Réel Périodique à contraintes Dures</b>	<b>TTRPD</b>
<b>Trafic Temps Réel Apériodique à contraintes Souples</b>	<b>TTRAS</b>
<b>Trafic Non Temps Réel</b>	<b>TNTR</b>

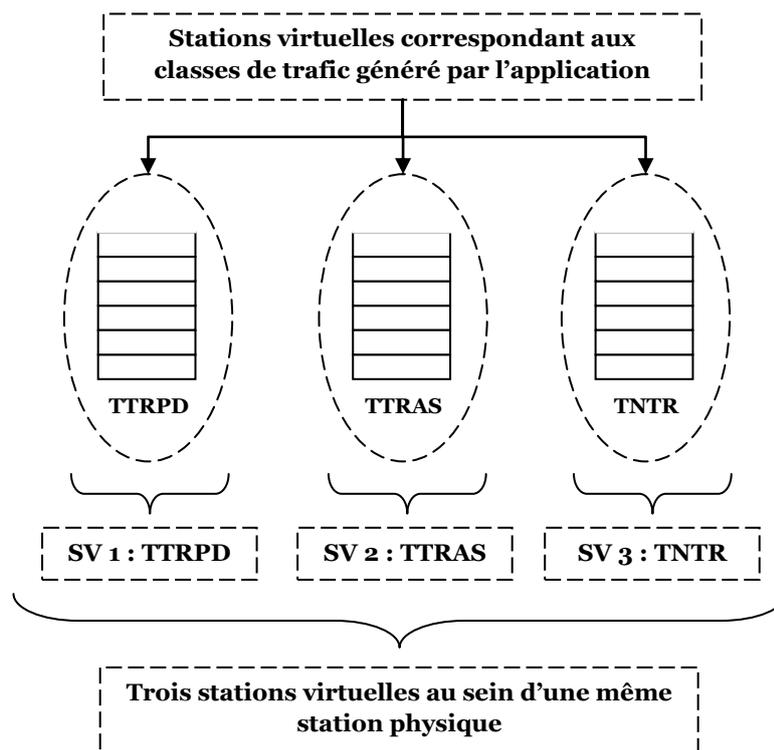
**Tableau IV. 3 :** Classes de trafic à considérer dans RT-MAC.

### **IV.2.3. Proposition d'une méthode de gestion des classes de trafic temps réel**

Dans le paragraphe précédent, nous avons dégagé trois classes de trafic à considérer dans notre proposition de protocole MAC temps réel RT-MAC, à savoir : un trafic temps réel périodique à contraintes dures (TTRPD), un trafic temps réel apériodique à contraintes souples (TTRAS) et un trafic qui ne représente aucune spécificité temporelle (TNTR). Dans ce présent paragraphe, nous allons nous

intéresser à la manière dont ces différentes classes de trafic seront gérées (tamponnées et ordonnancées localement) au niveau de la sous couche MAC d'IEEE 802.11. À cet effet, nous proposons l'implémentation des files d'attente dédiées pour chacune des classes de trafic et des politiques d'ordonnancement locales en adéquation avec les spécificités temporelles de ces dernières.

Dans la norme originelle de 802.11, le groupe de travail IEEE avait défini au niveau de la sous couche MAC 802.11 une seule file d'attente gérée en FIFO (First In First Out), pour tamponner temporairement avant transmission tout type de trafic susceptible d'être généré par les applications utilisateurs et/ou les protocoles et services des niveaux supérieurs. Les informations (terme générique pour désigner tout type de données) sont alors encapsulées dans des trames MAC 802.11 et enfilées dans une seule et unique file d'attente. Ces trames sont ordonnancées selon leurs dates d'arrivées sans prise en considération de leurs priorités d'accès au médium.



**Figure IV. 5 :** Concept de stations virtuelles et de station physique.

Dans l'objectif de rendre la couche MAC de 802.11 apte à satisfaire les contraintes temporelles des applications industrielles temps réel, nous proposons la mise en place de trois files d'attente relativement aux trois classes de trafic, citées

précédemment, qu'engendre l'application temps réel. Chacune de ces trois files d'attente va contenir une seule classe de trafic et portera ainsi son nom. Dans ce qui suit, ces files d'attentes seront dites : *Catégories d'Accès* (CA) ou simplement, des *Stations Virtuelles* (SV) (voir Figure IV.5), comme c'est le cas de l'IEEE 802.11e pour les trafics voix, vidéo, données et background.

Les classes de trafic temps réel que nous avons dégagées représentent des caractéristiques temporelles différentes (en termes de périodicité et de criticité) et l'utilisation des files d'attentes dédiées pour chacune de ces dernières, nous semble indispensable pour pouvoir offrir une certaine flexibilité et une autonomie de les gérer efficacement. Divers mécanismes seront appliqués pour satisfaire les besoins des classes de trafic temps réel, par conséquent les files d'attentes correspondantes vont se voir alors gérées différemment. D'où la notion de stations virtuelles qui représentent les différentes classes de trafic et la notion de station physique qui englobe les stations virtuelles (voir Figure IV.5). Dans le reste de ce paragraphe, nous allons définir des politiques d'ordonnement pour chacune des files d'attentes.

Une politique d'ordonnement appropriée à une classe de trafic au sein d'une station virtuelle est nécessaire pour permettre au paquet le plus urgent d'occuper la tête de la file d'attente. Dans ce qui suit, nous allons définir trois politiques d'ordonnement relativement aux catégories d'accès (TTRPD, TTRAS et TNTR) (voir Figure IV.6).

***Catégorie 1 (Stations Virtuelles TTRPD) :*** Pour les stations virtuelles contenant du trafic temps réel périodique à contraintes dures, nous allons appliquer une politique d'ordonnement à priorité. La priorité d'un paquet est calculée sur la base de sa période. Puisque le trafic de la catégorie 1 est caractérisé par une période relative à chaque paquet, alors la priorité du paquet va être égale à l'inverse de la période (voir Formule IV.1). Plus la période d'un paquet est grande plus le paquet est moins prioritaire. Donc, cette méthode d'ordonnement favorise les paquets de petites périodes. La priorité du paquet  $i$  est donnée par :

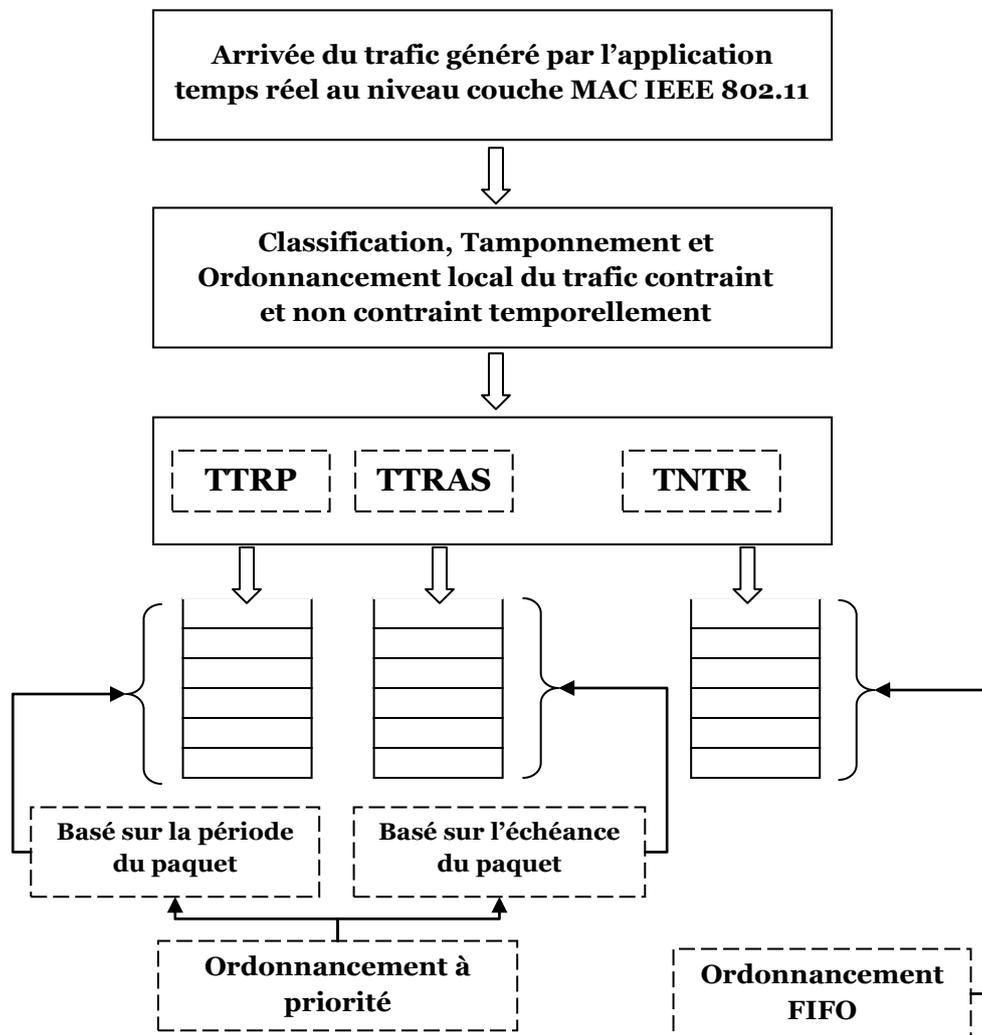
$$Pr_i = 1/P_i, \quad (IV.1)$$

Où  $P_i$  : la période du paquet  $i$

**Catégorie 2 (Stations Virtuelles TTRAS)** : Pour les stations virtuelles contenant un trafic temps réel aperiodique à contraintes souples, nous proposons toujours une politique d'ordonnancement à priorité. Sauf que cette fois-ci, les priorités vont être calculées à base des échéances des paquets, car pour cette catégorie de stations virtuelles, les périodes des paquets ne sont pas connues au préalable. Cette politique d'ordonnancement favorise les paquets ayant une date limite de remise la plus petite. Elle est calculée selon la formule (IV.2).

$$Pr_i = 1/E_i, \quad (IV.2)$$

Où  $E_i$  : la date limite du paquet  $i$



**Figure IV. 6** : Tamponnement et Ordonnancement local du trafic temps réel dans RT-MAC.

**Catégorie 3 (Stations Virtuelles TNTR) :** Pour les stations virtuelles qui contiennent du trafic ne représentant aucune spécificité temporelle, nous proposons de garder la politique d'ordonnancement FIFO appliquée par l'IEEE 802.11. Les paquets sont traités de la même manière sans différenciation de service, car ils ont la même priorité.

Dans ce paragraphe, nous avons proposé une méthode de gestion du trafic MAC généré par l'application temps réel. Nous avons défini des files d'attentes que nous avons appelées des catégories d'accès ou encore des stations virtuelles. Cette appellation concorde vraiment avec la manière dont ces files d'attentes seront gérées. Ces dernières comportent des classes de trafic de physionomies différentes et requièrent des mécanismes d'ordonnancement et d'accès au canal différents. Nous nous sommes contentés précédemment de définir des politiques d'ordonnancement locales pour chacune des classes de trafic temps réel. Ce type d'ordonnancement consiste à ordonnancer en local les trames appartenant à la même station virtuelle. Cependant un ordonnancement de type global, doit être aussi défini et mis en œuvre pour ordonnancer les stations virtuelles de même type.

#### **IV.2.4. Proposition d'une technique d'accès MAC hybride adéquate aux classes de trafic Temps réel**

Dans ce paragraphe, nous allons proposer une technique d'accès MAC qui pourra satisfaire les exigences de qualité de service des classes de trafic générées par l'application temps réel. Dans les paragraphes précédents, nous avons dégagé trois classes de trafic temps réel qui sont représentées chacune par une station virtuelle. Cette appellation est due à la diversité de la physionomie de ces classes de trafic; chacune est caractérisée par des spécificités temporelles différentes et par conséquent réclament des mécanismes de gestion de files d'attentes et des techniques d'accès différentes. Ci-après, nous commencerons par définir les paramètres de qualité de service à considérer dans notre technique d'accès RT-MAC. Ensuite, nous analyserons de près les caractéristiques temporelles des messages, pour proposer une méthode MAC adéquate.

Le protocole RT-MAC que nous développons tout au long de cette section est destiné à gérer les communications en environnement sans fil pour les applications industrielles temps réel de type contrôle-commande d'un procédé de production. Ce

genre d'applications stipule que la correction temporelle des dates d'acquisition de données et de fourniture de résultats est plus importante que la correction logique des informations transportées elles-mêmes. Donc, le paramètre de qualité de service major à considérer et sur lequel nous allons nous baser pour la proposition d'une technique d'accès au médium est le temps de réponse des messages. Sous un angle macroscopique, les messages venant de l'application peuvent être considérés comme soit Temps Réel ou Non Temps Réel. Nous pouvons à ce niveau (sans considérer les détails microscopiques concernant la périodicité et la criticité temporelle des messages Temps Réel) définir nos attentes de la méthode d'accès du protocole RT-MAC vis-à-vis de la transmission des messages temps réel et non temps réel :

- **Transmission des messages temps réel** : pour les messages temps réel, notre méthode d'accès devrait assurer des temps de réponse bornés supérieurement au pire des cas. Autrement dit, pour chacun de ces messages temps réel, une station virtuelle doit connaître sa date d'accès au canal et sa durée d'occupation du canal. Donc, vis-à-vis de la transmission des messages contraints temporellement, notre technique d'accès devrait fournir un accès déterministe.
- **Transmission des messages non temps réel** : pour les messages non temps réel, notre méthode d'accès devrait assurer des temps moyens de réponse globalement acceptables. Autrement dit, l'accès des flux de messages non temps réel au médium sans fil, doit être égalitaire et sans famine.

D'après l'identification des besoins de qualité de service des messages contraints et non contraints temporellement, nous comprenons que la méthode d'accès à proposer dans RT-MAC, devrait considérer des propriétés hétérogènes, à savoir:

- **La propriété du Déterministe** : Cette propriété stipule que les stations virtuelles, possédant des trafics contraints temporellement, devront avoir une connaissance parfaite et précise sur l'occupation du canal de communication. La propriété du déterminisme, consistera alors à diviser le canal de communication entre les stations virtuelles possédant des flux temps réel et l'accès s'effectuera de manière certaine et en exclusion mutuelle.

- **La propriété de l'Aléatoire :** L'accès en mode aléatoire ne garantit pas cependant la fiabilité des transmissions, car des collisions peuvent se produire et des messages par conséquent, peuvent se voir perdus. La considération de cette propriété pour la transmission des messages non temps réel est plutôt pour sa capacité à garantir un accès égalitaire et l'évitement de la famine.

Précédemment, nous avons considéré les caractéristiques temporelles macroscopiques (Temps réel et Non Temps réel) des messages générés par l'application temps réel, pour identifier nos attentes de la méthode d'accès que nous proposerons pour RT-MAC (un temps d'accès borné pour les messages temps réel et un temps de réponse moyen pour les messages non temps réel). Par conséquent, notre méthode d'accès devrait avoir un comportement déterministe pour définir de manière certaine des intervalles de temps fixe et connus au préalable pour transférer les messages temps réel. Quant aux messages non temps réel, notre méthode d'accès devrait se comporter de manière aléatoire pour garantir un accès égalitaire et sans famine. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser aux propriétés microscopiques des messages temps réel (la périodicité et la criticité temporelle) pour proposer des techniques d'accès pour chacune des classes de trafic conformément à leurs spécificités temporelles.

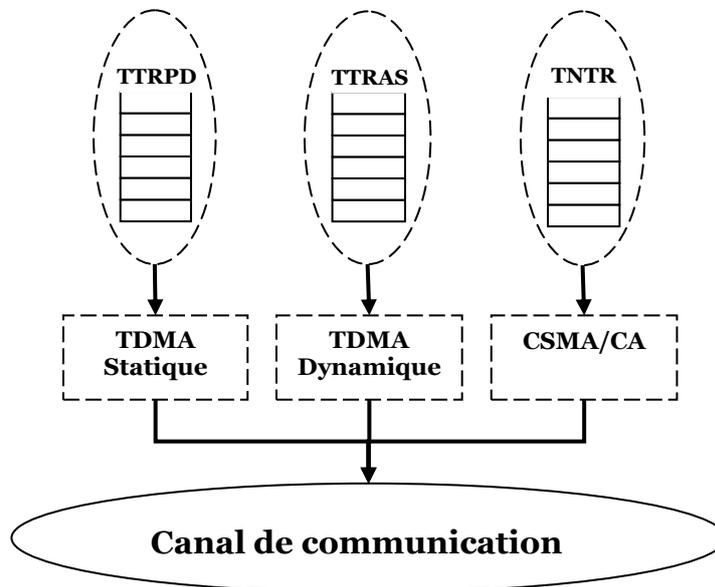
- **Stations Virtuelles TTRPD :** Les stations virtuelles TTRPD contiennent des messages périodiques à contraintes dures. Pour cette catégorie de messages temps réel, le non respect des contraintes temporelles des messages est intolérable ; un message livré après sa date limite est inaudible vis-à-vis de l'applicatif, même si, sa transmission au niveau physique s'est déroulée avec succès. Néanmoins, les messages de cette classe de trafic TTRPD sont caractérisés par une périodicité bien définie et connue au préalable. Ceci permettra de compenser le caractère de la criticité des contraintes temporelles. Pour garantir un temps d'accès borné, nous proposons une technique d'allocation du canal avec réservation implicite, car les instants d'arrivées des messages TTRPD sont connus avant même le démarrage de l'application temps réel. La méthode qui permettra de réaliser ce type d'accès existe. Elle est très largement abordée, répandue dans la littérature et implémentée en pratique. Il s'agit de la méthode TDMA Statique ; l'appellation TDMA signifie : un accès multiple par division du temps globale et la spécificité statique de

cette méthode signifie que les intervalles de temps alloués aux stations virtuelles TTRPD ne changent pas durant la durée d'exécution de l'application temps réel, car les mêmes messages avec les mêmes caractéristiques temporelles sont régénérés à chaque période de temps par l'application temps réel. Nous pensons que cette variante statique de TDMA répond parfaitement aux spécificités des stations virtuelles TTRPD et permettra alors de garantir leurs exigences en qualité de service temporelle.

- **Stations Virtuelles TTRAS :** Les stations virtuelles TTRAS contiennent une classe de trafic temps réel de périodicité non définie au préalable ; le trafic TTRAS arrive de manière aléatoire et les instants d'arrivées ne sont pas connus à priori. Cette spécificité du trafic TTRAS engendre une contrainte quant à la garantie d'un temps d'accès borné (il se peut que les échéances de certains messages soient manquées à cause de la variabilité des instants de leurs arrivées). Néanmoins, la criticité temporelle de cette classe de trafic est moins accrue, c'est-à-dire, le non respect des échéances temporelles ne provoque pas des désagréments majeurs (car il s'agit d'un temps réel souple ou non critique). Donc, la souplesse des contraintes temporelles du trafic TTRAS peut compenser la contrainte de la variabilité des instants d'arrivées de ce trafic. Pour assurer la livraison des messages TTRAS dans des délais qui soient inférieurs à leurs échéances, il va falloir procéder à l'allocation du canal de communication. Mais, la réservation du canal cette fois-ci s'effectuera de manière explicite car les besoins en temps d'accès pour ce trafic changent dynamiquement. La méthode d'allocation du canal de communication avec des réservations explicite est aussi connue dans la littérature, il s'agit d'une autre variante de la méthode TDMA connue sous le nom TDMA Dynamique. TDMA ; pour accès multiple par division du temps global et dynamique signifie que le canal est réservé de manière dynamique selon le trafic généré par l'application temps réel. Nous pensons que cette méthode concorde avec les spécificités temporelles et répond aux exigences de qualité de service de la classe TTRAS.
- **Station virtuelle TNTR :** Les stations virtuelles TNTR représentent une classe de trafic qui ne présente aucune spécificité temporelle. Pour cette

catégorie de classe de trafic, le plus important est d'assurer un accès égalitaire entre les différents flux TNTR et l'évitement de famine, afin de garantir des temps moyens de réponse globalement acceptables. Nous proposons alors de garder la méthode d'accès CSMA/CA du standard IEEE 802.11. Dans un environnement de réseau complètement connecté et sous la condition d'absence des nœuds cachés, cette méthode garantie un taux d'accès identique (en terme de nombre de paquets par unité de temps) pour les différentes stations du réseau.

Dans cette section, nous avons proposé une méthode d'accès hybride qui assure à la fois le déterminisme pour le trafic temps réel et l'aléatoire pour le trafic non temps réel. Pour le trafic temps réel, nous avons proposé d'utiliser deux variantes de la méthode TDMA ; la première s'agit du TDMA Statique pour le trafic temps réel TTRPD et la deuxième s'agit du TDMA Dynamique pour le trafic temps réel TTRAS. Concernant le trafic TNTR, nous avons choisi d'utiliser la méthode CSMA/CA exploitée déjà par le standard IEEE 802.11. Le schéma IV.7, montre un récapitulatif de cette méthode d'accès hybride TDMA (Statique, Dynamique)/CSMA-CA.



**Figure IV. 7 :** Méthode d'accès Hybride TDMA (Statique, Dynamique)/CSMA-CA.

#### **IV.2.5. Adoption et Adaptation d'un mode de communication centralisé pour le protocole RT-MAC**

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser au mode de communication à mettre en œuvre dans notre protocole RT-MAC. Ce mode de communication détermine la manière dont les stations accèdent au canal et communiquent avec leurs destinataires. Les réseaux sans fil en général et les réseaux WLANs en particulier, possèdent deux modes de communication : un mode centralisé, ou avec infrastructure ; où une station de base (Point d'accès) gère les accès au médium sans fil et joue le rôle d'une passerelle pour relayer le trafic entre les différentes stations du réseau. Un autre mode de communication sans infrastructure ou Ad hoc ; où toute station joue à la fois le rôle d'un émetteur et d'un routeur pour relayer les paquets de données aux destinataires. Pour notre protocole RT-MAC, nous allons adopter un mode de communication centralisé. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons argumenter notre choix, comme nous allons décrire les adaptations que nous apporterons pour ce mode de communication dans RT-MAC.

***Communication en mode centralisé.*** Nous avons très rapidement remarqué dans le chapitre III que le mode Ad hoc (sans infrastructure ou autonome) n'est pas adapté aux communications temps réel et que la majorité des solutions qui visent à introduire une certaine garantie de service, sont généralement basées sur des approches centralisées. Dans le cadre des communications temps réel, le mode de communication ad hoc ne garantit pas des délais d'accès bornés, car les méthodes d'accès mises en œuvre sont conçues à base d'algorithmes aléatoires qui ne pourront jamais et en aucun cas donner une borne des délais même d'une manière approximative. Une solution centralisée pour orchestrer les accès au médium sans fil s'impose en général et dans notre contexte en particulier pour garantir des délais d'accès bornés supérieurement au pire des cas pour l'acheminement du trafic temps réel. Dans la technique d'accès que nous avons proposée au paragraphe IV.2.4 (Méthode d'accès hybride TDMA (Statique, Dynamique)/CSMA-CA), le temps globale doit être divisé et des intervalles de temps vont être attribués aux différentes stations virtuelles. Ces tâches de découpage du temps global et de distribution des intervalles de temps, vont être sans doute prises en charge par une seule entité pour garantir la synchronisation entre les stations et la satisfaction de leurs besoins.

**Adaptation du mode centralisé pour RT-MAC.** L'adoption du mode de communication centralisé pour RT-MAC nécessite qu'il soit adapté pour répondre aux exigences et à la nature des communications industrielles temps réel.

- **Communications directes entre stations :** Les communications en mode centralisé exigent que chaque communication entre stations transite obligatoirement par le point d'accès. Donc, chaque communication nécessitera le double de bande passante et de délai d'acheminement. Dans le cadre des communications industrielles temps réel, nous ne pouvons pas tolérer qu'un paquet de données soit transité par le point d'accès, car ceci conduira sans doute à un retard de sa livraison. Donc, pour notre protocole RT-MAC, nous proposons que la station de base (Point d'accès) se contente uniquement d'orchestrer les accès au canal sans fil et d'organiser les canaux de communication entre les différentes stations virtuelles. Concernant l'acheminement de données entre ces dernières, la station de base ne jouera aucun rôle. Autrement dit, les stations vont communiquer directement, sauf pour les échanges inter-cellule, où l'intervention du point d'accès est nécessaire.
  
- **Transmission des messages temps réel sans acquittement :** La confirmation par des acquittements de la bonne réception des messages temps réel est inutile dans le cadre des applications temps réel. De toute manière, les messages temps réel ne sont pas retransmis ; car ces derniers perdent leurs pertinences avec le temps. Les messages livrés après la date limite de leurs échéances sont inaudibles vis-à-vis de l'applicatif. Les acquittements ne font alors que prolonger davantage les délais de transmission des messages temps réel.
  
- **Mobilité des stations sans fil en milieu industriel :** Les stations sans fil composant un réseau industriel et participant à l'exécution de l'application temps réel contrôle-commande d'un procédé de production, peuvent être classifiées selon leurs comportements de mobilité en trois types :
  1. **Stations sans fil immobiles :** Les stations sans fil immobile représentent la plupart des composants d'un système de contrôle

industriel (Automates, Capteurs, Actionneurs, ...). Ces composants sont en relation directe avec le processus de production, c'est pour cette raison qu'ils sont placés à des endroits bien spécifiques pour effectuer des tâches particulières de captage et/ou de commande.

2. **Stations sans fil avec un comportement de mobilité intra-cellule :** Ces stations représentent aussi la plupart des composants du système de contrôle industriel. Ce comportement est intéressant pour des raisons de flexibilité, suite par exemple à une réorganisation du processus de production.
3. **Stations sans fil avec un comportement de mobilité inter-cellule :** Les stations sans fil avec un comportement de mobilité inter-cellule représentent généralement des équipements de type PDA utilisés par des agents de maintenance pour la détection de panne sur le système de contrôle industriel.

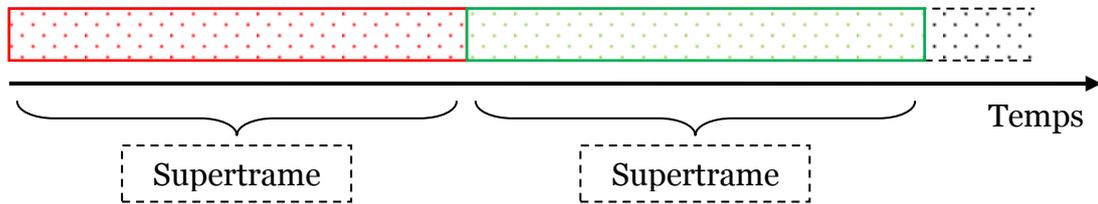
Dans le cadre des applications industrielles, le comportement de mobilité d'une station sans fil, peut être associé à la nature du trafic généré par cette dernière. Le trafic temps réel n'est généré que par les stations sans fil immobiles (fixes) ou avec un comportement de mobilité intra-cellule. Alors que les stations sans fil qui exhibent un comportement de mobilité inter-cellule ne génèrent que du trafic non temps réel.

#### **IV.2.6. Organisation des canaux de communication et Orchestration des accès au médium sans fil**

Dans ce paragraphe, nous allons traiter le dernier point de notre proposition de protocole RT-MAC. Il s'agit de la manière dont le médium de communication sera organisé et dont les accès seront orchestrés sur le médium sans fil.

Avec notre protocole RT-MAC, le temps global sur le médium de communication sans fil sera découpé en intervalles de temps de durées égales, appelées intervalles de supertrames ou des macrocycles (Voir Figure IV.8). Une supertrame ou un macrocycle représente un cycle d'échange de messages entre les

composants du système de Contrôle-Commande. Ces derniers sont générés pendant un cycle d'exécution de l'application temps réel. Durant cette période de supertrame, des messages appartenant aux différentes classes de trafic seront envoyés et reçus par les différents composants du système de contrôle industriel.



**Figure IV. 8 :** Intervalles de Supertrames (Macro-Cycles).

Une supertrame va être découpée en deux types de canaux de communication (ou de microcycles, voir Figure IV.9) :

**Canaux de Transmission :** Les canaux de transmission vont être utilisés pour la transmission des messages générés par l'application temps réel. Nous distinguons trois types de canaux de transmission en correspondance avec les classes de trafic temps réel :

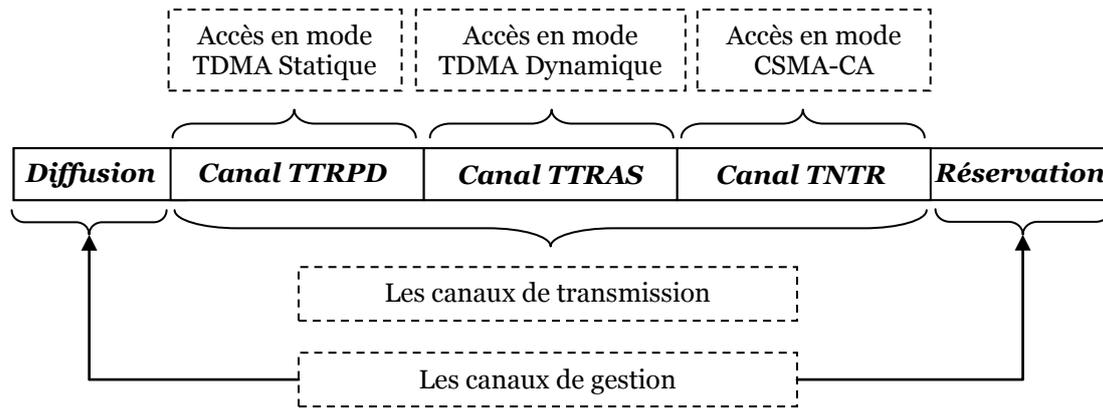
- 1. Canal de transmission de messages TTRPD :** Durant ce canal, des messages temps réel périodiques à contraintes dures seront envoyés et reçus suivant la technique d'accès TDMA statique.
- 2. Canal de transmission de messages TTRAS :** Durant ce canal, des messages temps réel apériodique à contraintes souples seront envoyés et reçus suivant la technique d'accès TDMA dynamique.
- 3. Canal de transmission de messages TNTR :** Ce canal de transmission sera consacré à la transmission des messages qui ne représentent aucune spécificité temporelle suivant la méthode CSMA/CA.

**Canaux de Gestion :** Nous définissons deux types de canaux de gestion pour organiser les canaux de transmission et pour orchestrer les accès au médium sans fil :

- 1. Canal de diffusion :** Le canal de diffusion sera utilisé par le point d'accès pour diffuser à l'ensemble des stations du réseau des informations sur

l'organisation des canaux de transmission (dates début et fin de chaque canal de transmission, attribution de droit d'accès aux stations sans fil, ...).

2. **Canal de réservation** : durant ce canal, les stations virtuelles TTRAS vont pouvoir exprimer leurs besoins au point d'accès en termes de temps d'accès pour transmettre leurs messages TTRAS.



**Figure IV. 9** : Structure d'une Supertrame (Macrocycle).

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à la présentation de notre protocole RT-MAC pour les applications industrielles temps réel. L'évaluation des aptitudes temps réel de RT-MAC va constituer notre objectif dans la prochaine section.

### **IV.3. Evaluation de performances et validation du protocole RT-MAC**

Cette section sera consacrée à l'évaluation de performances de notre proposition de protocole RT-MAC pour les applications industrielles temps réel. Nous commencerons dans le premier paragraphe (IV.3.1) par donner le procédé d'évaluation de performances. Dans le paragraphe (IV.3.2), nous décrirons notre outil de simulation (WNS-RTIA). Finalement, dans le paragraphe (IV.3.3), nous présenterons et nous analyserons nos résultats de simulation.

#### **IV.3.1. Procédé d'évaluation de performances du protocole RT-MAC**

Pour évaluer les performances de notre protocole RT-MAC et valider les adaptations protocolaires que nous avons proposées dans la norme originale IEEE

802.11, pour les applications industrielles temps réel de type Contrôle-Commande d'un procédé de production, nous avons choisi de procéder de la manière suivante :

***Choix d'une méthode d'évaluation de performances :***

L'évaluation de performances des systèmes informatiques et des réseaux de télécommunication est une problématique de point de vue méthodologique. Le choix d'une méthode d'évaluation de performances (Analytique, Simulation ou Mesure) adaptée, dépendra du contexte de l'étude. Dans notre cas, nous avons opté pour la simulation afin de réaliser l'étape d'évaluation de performances de notre travail. Ce choix est le plus adapté ; car n effet, en procédant par cette méthode, nous pourrions construire des modèles de simulation qui représenteront le plus fidèlement possible les deux protocoles IEEE 802.11 et RT-MAC ; et de même il nous serait difficile d'obtenir les mesures de performances si l'une des autres méthodes d'évaluation de performances a été choisie.

***Métriques de performances à calculer :***

Pour analyser les performances des deux protocoles MAC IEEE 802.11 et RT-MAC sur le plan temporel, nous avons opté pour un certain nombre de métriques de performances cités ci-dessous.

- 1. Temps Moyen de Réponse :** C'est une mesure de performance globale du réseau à simuler, elle permet de donner une idée générale sur les délais des paquets transmis sur le réseau durant la simulation. Cette métrique peut être aussi utilisée pour prédire les quantités de messages reçus avec échéance respectée ou avec échéance dépassée ; quand le temps moyen de réponse se rapproche du délai critique de remise des messages temps réel, ceci veut dire qu'un nombre élevé de messages ont manqué leurs échéances et vis versa quand nous observerons que cette valeur s'éloigne du délai critique.
- 2. Temps Maximum de Réponse :** C'est une performance relative au délai le plus lent de tous les paquets envoyés et reçus correctement du point de vue MAC. Lorsque le temps maximum de réponse est inférieur ou égale au délai critique, ceci veut dire que tous les paquets transmis sur le réseau et reçus correctement par la couche MAC sont aussi reçus correctement par la couche application (les contraintes de temps des messages sont respectées). Quand

cette métrique dépasse le délai critique, ceci veut dire qu'au moins un paquet est perdu par dépassement d'échéance (paquet rejeté par la couche application malgré qu'il soit reçu correctement par la couche MAC).

- 3. Taux de Paquets Reçus avec une Echéance Respectée (ER) :** Il permet de quantifier et de donner exactement le pourcentage de paquets reçus correctement au niveau MAC et pour lesquels les contraintes temporelles sont aussi respectées (correction de point de vue application).
- 4. Taux de Paquets Reçus avec une Echéance Dépassée (ED):** Permet de quantifier le pourcentage de paquets reçus correctement de point de vue MAC mais rejetés au niveau application ; car les dates de livraison de ces paquets ont été supérieures au délai critique.
- 5. Taux de Paquets Bruités :** Permet de calculer le pourcentage de paquets rejetés par la couche MAC à cause des erreurs de transmission dues à la nature physique de propagation des ondes radio.
- 6. Nombre de Collisions :** Par rapport au nombre de paquets transmis durant un cycle d'échange de messages, cette métrique permet de quantifier le nombre de collisions qui ont été produites.

***Paramètres MAC et PHY utilisés :***

Les valeurs des paramètres de la couche MAC et PHY qui seront utilisés durant la simulation pour calculer les métriques de performance sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

<b><i>Paramètres de DSSS PHY</i></b>	<b><i>Valeur numérique</i></b>
<i>Temps de propagation du signal</i>	<i>1 <math>\mu</math> s</i>
<i>DIFS</i>	<i>50 <math>\mu</math> s</i>
<i>SIFS</i>	<i>10 <math>\mu</math> s</i>
<i>Durée d'un slot vide</i>	<i>20 <math>\mu</math> s</i>
<i>Débit de transmission des paquets de contrôle (ACK)</i>	<i>2 Mbits/s</i>
<i>Débit de transmission des paquets de données</i>	<i>11 Mbits/s</i>

---

<i>Débit de transmission de l'entête PHY</i>	<i>1 Mbits/s</i>
<i>Débit de transmission de l'entête MAC</i>	<i>2 Mbits/s</i>
<i>Taille minimale de la fenêtre de contention</i>	<i>32</i>
<i>Taille maximale de la fenêtre de contention</i>	<i>1024</i>
<i>Nombre maximum de retransmissions</i>	<i>7</i>
<i>Taille de l'entête PHY</i>	<i>192 bits</i>
<i>Taille de l'entête MAC</i>	<i>34 octets</i>
<i>Taille de ACK</i>	<i>14 octets</i>
<i>Taille maximale de la trame MAC</i>	<i>2312 octets</i>

---

**Tableau IV. 4 :** Paramètres de la couche MAC et PHY (HR-DSSS).

***Différents cas à analyser :***

Les différents cas que nous discuterons par la suite se résument principalement en trois points :

1. Premièrement, nous identifierons les imperfections de la norme IEEE 802.11 vis-à-vis des contraintes temporelles des applications industrielles temps réel. Nous présenterons des résultats de simulation qui prouvent l'inadaptabilité de cette norme telle qu'elle est spécifiée dans le standard pour être un support de communication en milieu industriel.
2. Deuxièmement, nous analyserons les aptitudes temps réel de notre protocole RT-MAC. Nous commencerons par simuler ce protocole dans les conditions idéales, de propagation des ondes radios (canal de communication parfait). L'objectif de ces simulations, étant de valider les garanties temps réel assurée par RT-MAC au niveau couche liaisons de données (c'est-à-dire, en absence des phénomènes du monde physique, notre protocole RT-MAC devrait assuré au niveau couche liaisons de données des délais de remise, de messages temps réel, bornés supérieurement au pire des cas et un taux de perte de paquets dû aux collisions relativement nul)
3. Par la suite, nous allons soumettre notre protocole RT-MAC aux conditions réelles de propagation des signaux radios par considération du taux d'erreur

par bit, BER. La prise en compte de ce paramètre dans notre protocole RT-MAC, va affecter la qualité des transmissions au niveau physique ; des pertes de données vont être observées au niveau MAC. Néanmoins son impact sur les performances de RT-MAC en termes de taux de perte, ne devrait pas se répercuter sur les délais des messages qui vont être livrés correctement au niveau MAC.

### **IV.3.2. Description de l'outil de Simulation WNS-RTIA**

Ce paragraphe sera consacré à la description de l'outil de simulation WNS-RTIA (*Wireless Network Simulator designed for Real Time Industriel Applications ; Simulateur de Réseaux Sans fil destiné pour les applications industrielles Temps Réel*), que nous avons conçu et implémenté dans le cadre de ce projet de Magister pour évaluer les performances de notre protocole RT-MAC.

#### **IV.3.2.1. Spécification des besoins (cahier des charges)**

Pour établir le cahier des charges du simulateur WNS-RTIA, nous avons utilisé le langage de spécification SADT. Ce langage est un formalisme simple, facile à apprendre et efficace pour exprimer les besoins de l'utilisateur.

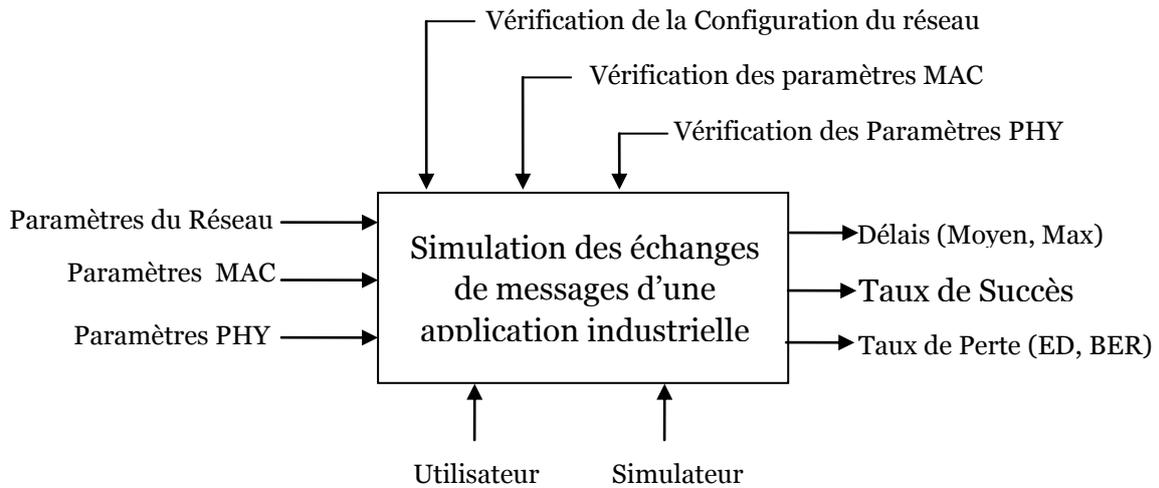
##### ***Besoins fonctionnels :***

1. Le simulateur est dédié pour simuler les échanges de messages entre les composants d'une application industrielle temps réel ;
2. Le simulateur implémente le protocole MAC IEEE 802.11 ;
3. Le simulateur implémente notre protocole MAC temps réel RT-MAC ;
4. Le simulateur implémente un modèle d'erreur pour l'environnement radio ;
5. Le simulateur génère un fichier trace de simulation ;
6. Calcul des mesures de performances : temps moyen de réponse, temps maximum de réponse, taux de paquets livrés avant l'échéance, taux de paquets livrés après l'échéance, taux de perte dû au BER, nombre de collisions.

##### ***Besoins non fonctionnels :***

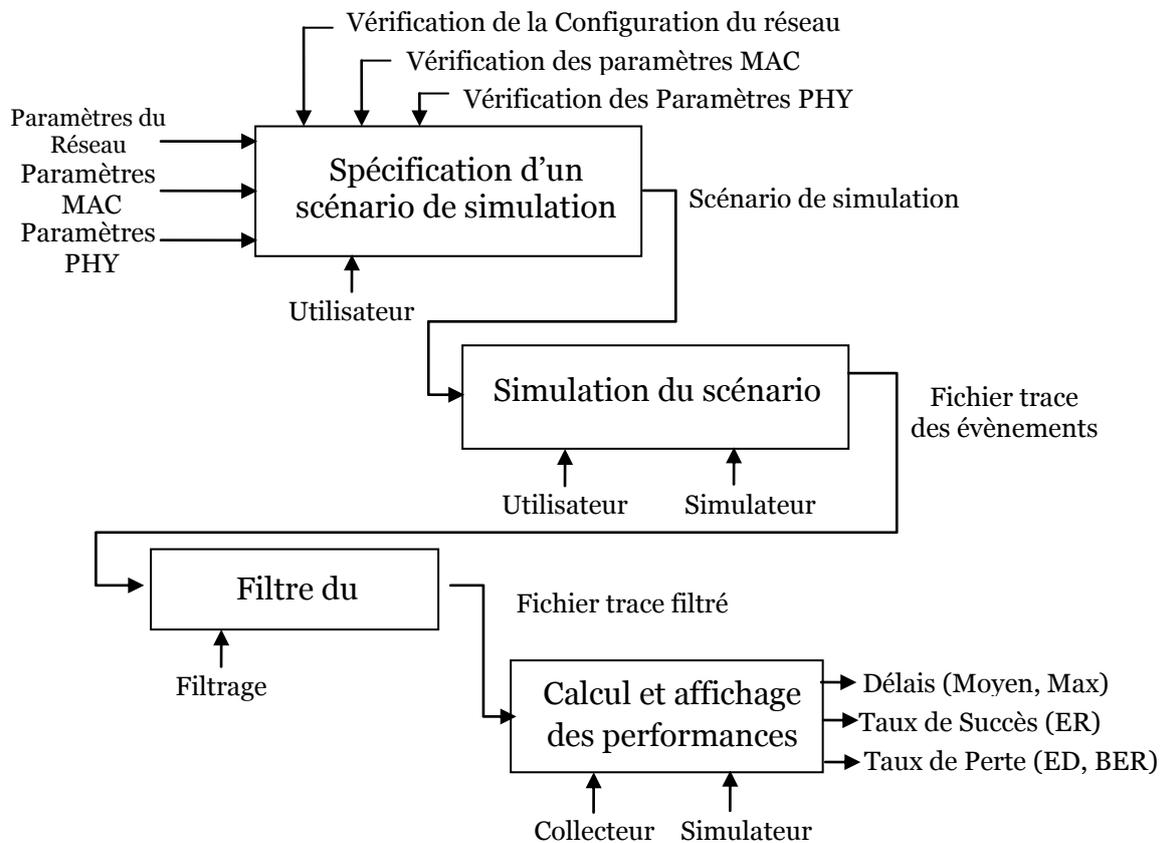
1. La programmation parallèle multi-threads en C sous Linux ;
2. Scalabilité, extensibilité, rapidité, facilité d'utilisation, vivacité et modularité.

**Schéma général de SADT :**



**Figure IV. 10 :** Schéma général de SADT du simulateur WNS-RTIA.

**Schéma détaillé de SADT :**



**Figure IV. 11 :** Schéma détaillé de SADT du simulateur WNS-RTIA.



#### **IV.3.2.2. Conception du Simulateur WNS-RTIA (Diagramme de classes)**

La figure IV.12 présente le diagramme de classes du simulateur WNS-RTIA que nous avons développé en utilisant le langage de modélisation objet UML. Ce diagramme exprime la structure statique du simulateur en termes de classes et de relations entre ces classes. Il montre que notre simulateur est composé de deux modules principaux, le moteur et le scénario de simulation. Le premier est constitué des classes de base nécessaires à la création d'un scénario et lancement d'une simulation, estampillage et ordonnancement des événements, filtrage, collection et calcul des mesures de performance. Le deuxième contient les composants d'un scénario de simulation, dont la classe principale est le nœud qui est composé essentiellement d'un générateur de paquets, d'une carte réseaux sans fil (couche physique, protocole MAC 802.11 et notre protocole MAC temps réel RT-MAC) et d'un module d'erreur pour détecter les paquets erronés à cause des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques.

#### **IV.3.2.3. Implémentation du Simulateur WNS-RTIA**

##### ***Outils de programmation :***

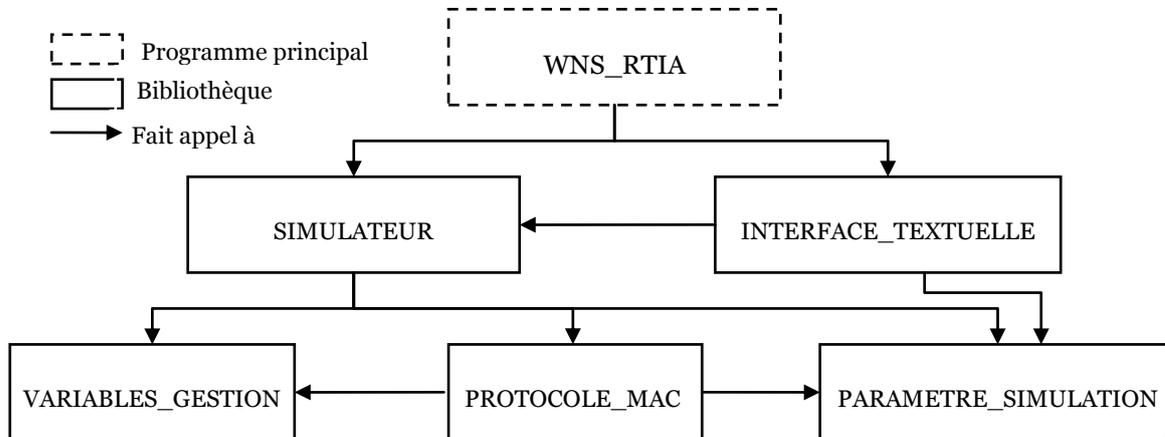
En raison d'appartenance du protocole IEEE 802.11 et notre protocole MAC temps réel RT-MAC à la famille des algorithmes de communication asynchrone qui s'exécutent d'une manière parallèle et concurrentielle par les différents nœuds du réseau pour accéder au canal radio, nous avons opté pour la programmation multithread avec le langage C sous Linux afin de réaliser le simulateur WNS-RTIA.

Le mot thread peut se traduire par «fil d'exécution », c'est à dire un déroulement particulier du code du programme, qui se produit parallèlement à d'autres entités en cours de progression. Les threads représentent un concept relativement nouveau dans le domaine de la programmation. Il s'agit d'une manière différente d'aborder la conception multitâche. Linux implémente les mécanismes qui permettent d'accéder à la puissance des threads avec la portabilité de la norme Posix.1c.

Pour avoir un bon partage de données et une bonne synchronisation et communication entre les nœuds du réseau, nous avons utilisé les threads de la norme Posix.1.c, les IPC system V (files de messages) et les outils POSIX (mutex et variables conditions).

### Architecture globale du simulateur WNS-RTIA :

Notre simulateur est organisé en modules, un programme principal et cinq bibliothèques (voir la figure IV.13) :



**Figure IV. 13 :** Architecture globale du simulateur WNS\_RTIA.

1. **WNS\_RTIA** : C'est le programme principal qui représente le noyau du simulateur. Il permet l'initialisation des paramètres de simulation, la création des nœuds, la simulation et le calcul des mesures de performance ;
2. **SIMULATEUR** : Cette bibliothèque contient toutes les procédures représentant les fonctionnalités du simulateur ;
3. **INTERFACE\_TEXTUELLE** : Elle comporte les procédures permettant l'interaction utilisateur/simulateur;
4. **PROTOCOLE\_MAC** : C'est la bibliothèque où toutes les procédures et fonctions du protocole IEEE 802.11 et RT-MAC sont implémentées ;
5. **PARAMETRE\_SIMULATION** : Elle comprend les paramètres des couches PHY et MAC et ceux du réseau à simuler ;
6. **VARIABLES\_GESTION** : Elle contient toutes les variables de gestion manipulées par le simulateur.

### Implémentation des composants du simulateur WNS\_RTIA :

1. **Horloge** : Elle permet d'incrémenter le temps de simulation. Elle est implémentée sous forme d'un thread ;
2. **Nœud** : Il est composé d'un générateur de paquets et d'un contrôleur d'accès au médium ;

3. **Générateur de paquets** : C'est un thread qui permet la génération et l'enfilement des paquets de données dans la file d'attente du nœud associé ;
4. **File d'attente** : Elle est implémentée sous forme de file de messages des IPC system V, qui est une boîte aux lettres contenant les paquets du générateur de paquets ;
5. **Paquet** : C'est une structure de données contenant les champs suivants : identifiant de l'émetteur, identifiant du récepteur, taille du paquet, instant d'arrivée, instant début de service, instant fin de service, temps de réponse et état du paquet (reçu avant échéance, reçu après échéance, détruit à cause des collisions ou perdu à cause du BER) ;
6. **Contrôleur d'accès au médium** : C'est un thread qui permet d'exécuter le code du protocole MAC 802.11 ou RT-MAC pour permettre au nœud associé d'accéder au canal radio ;
7. **Partage des variables** : Les variables partagées entre les nœuds du réseau sont protégées par le sémaphore POXIS « mutex » ;
8. **Synchronisation** : La synchronisation entre les différents nœuds pour accéder au canal radio est assurée par l'utilisation d'une variable condition POSIX ;
9. **Fichier trace** : Il est implémenté sous forme d'un flux de données d'extension « .tr ».

### **IV.3.3. Analyse des performances et Validation du protocole RT-MAC**

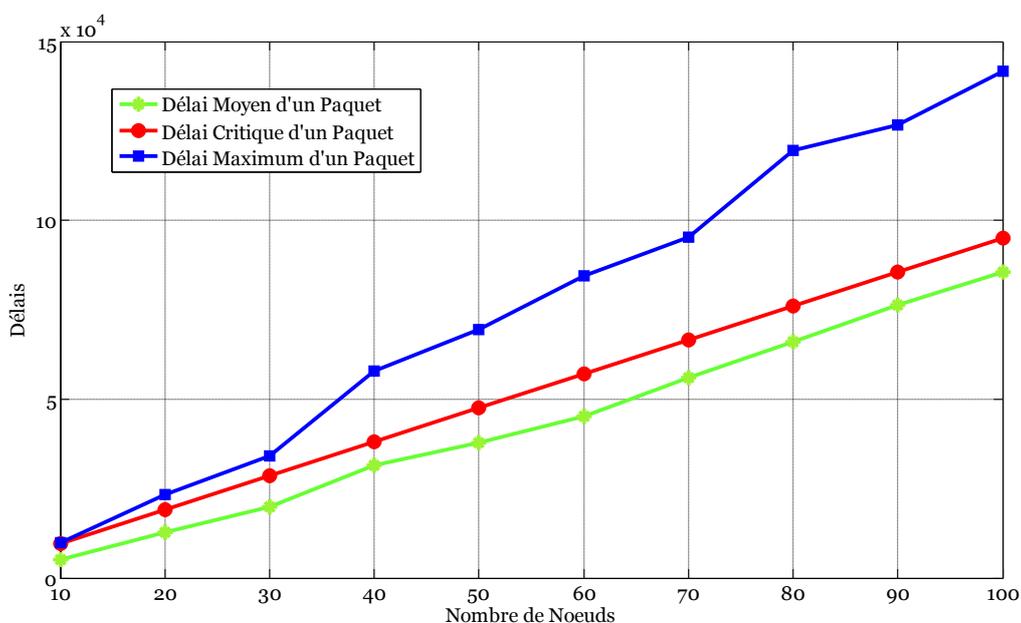
Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulations que nous avons obtenus avec notre simulateur WNS\_RTIA. Ces résultats de simulations relativement aux métriques de performances indiquées dans le paragraphe IV.3.1, vont être exploités d'une part, pour prouver l'inadaptabilité du protocole MAC IEEE 802.11 dans un milieu industriel et d'autres parts, nos résultats de simulations vont montrer les aptitudes temps réel de notre proposition de protocole RT-MAC et le valider sur le plan temporel pour une utilisation où les contraintes de temps sont fortes.

#### **IV.3.3.1. Imperfection de la norme IEEE 802.11 sur le plan temporel**

Pour montrer l'inadaptabilité du protocole MAC IEEE 802.11 pour supporter les contraintes temporelles des applications industrielles temps réel, nous avons choisi d'effectuer les simulations suivantes. Nous avons fixé la taille des paquets de

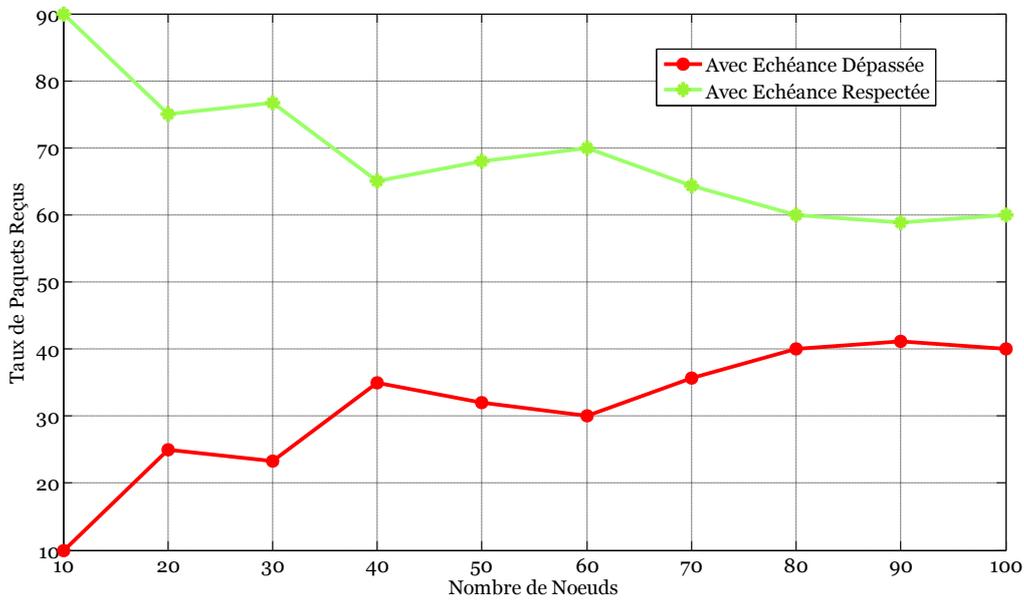
données à 256 octets et nous avons fait varier le nombre de nœuds dans le réseau de 10 à 100 (la taille des paquets de données choisie est relativement courte car les informations échangées entre les composants d'une application industrielle sont généralement dotées d'une taille petite). Nous avons aussi choisi d'effectuer ces simulations en environnement idéal ( $BER=0$ ), sans considérer l'influence du canal radio sur les transmissions ; car notre objectif est de se focaliser sur les imperfections de la couche MAC du protocole IEEE 802.11, c'est-à-dire les pertes de données au niveau couche MAC (dues aux collisions répétitives sur les paquets de données) et au niveau couche Application (dues aux dépassements des délais critiques de remise des messages temps réel). Les résultats de simulation du protocole IEEE 802.11, sont représentés sur les figures (Figure IV.14, Figure IV.15 et Figure IV.16).

La figure IV.14 montre le délai moyen de réponse et le délai maximum de réponse d'un paquet de données, obtenus avec le protocole MAC IEEE 802.11. Nous remarquons sur cette figure que le temps moyen de réponse d'un paquet est inférieur à son délai critique, mais la différence n'est pas vraiment aussi importante. Par contre, nous observons que le temps maximum de réponse est toujours supérieur au délai critique de remise des messages temps réel. Nous remarquons que, plus le nombre de nœuds dans le réseau augmente, plus que le temps maximum de réponse d'un paquet s'éloigne de son délai critique.

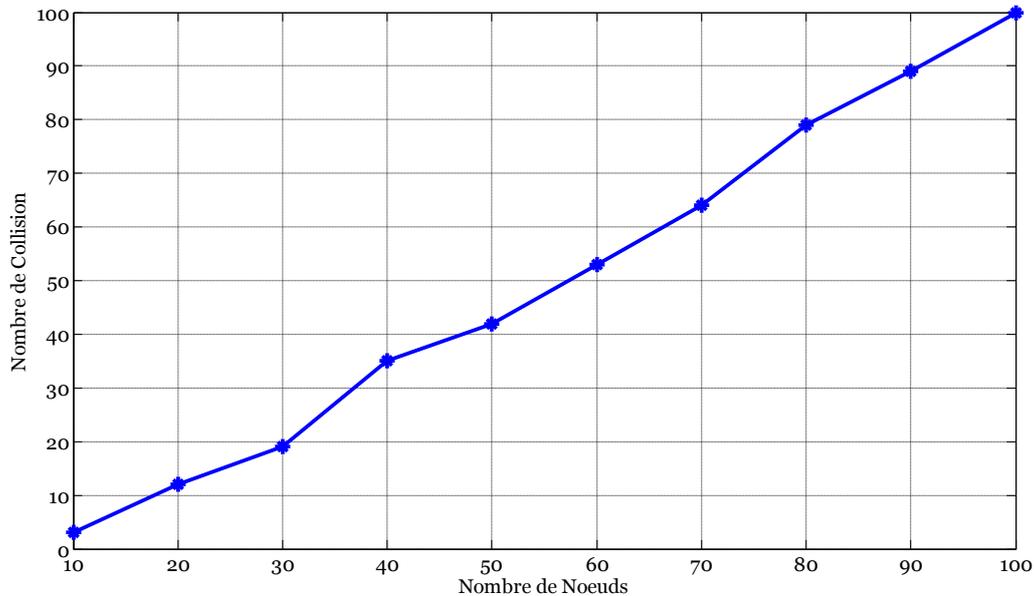


**Figure IV. 14 :** Délai Moyen et Maximum d'un paquet avec le protocole MAC 802.11.

Les résultats représentés au niveau de la figure IV.14, montrent que des paquets de données sont livrés après leurs échéances; c'est-à-dire que ces paquets seront rejetés par l'application malgré qu'ils soient correctement reçus par la couche MAC.



**Figure IV. 15 :** Taux de paquets reçus avant/après le délai critique avec le protocole MAC 802.11.



**Figure IV. 16 :** Nombre de collisions produites durant un cycle d'échange de messages temps réel avec le protocole MAC 802.11.

Pour quantifier le pourcentage de paquets reçus avant et après leurs dates limites de livraison, nous avons dressé les deux courbes présentées sur la figure IV.15. Cette figure montre que, plus le nombre de nœuds augmente dans le réseau, plus que le nombre de messages livrés après leurs échéances augmente et que le nombre de messages livrés avant leurs échéances diminue. Ce phénomène peut être interprété par le nombre de collisions répétitives produites sur les paquets de données (voir Figure IV.16). Ainsi, plus le nombre de nœuds augmente dans le réseau plus que le nombre de collisions augmente d'une manière proportionnelle.

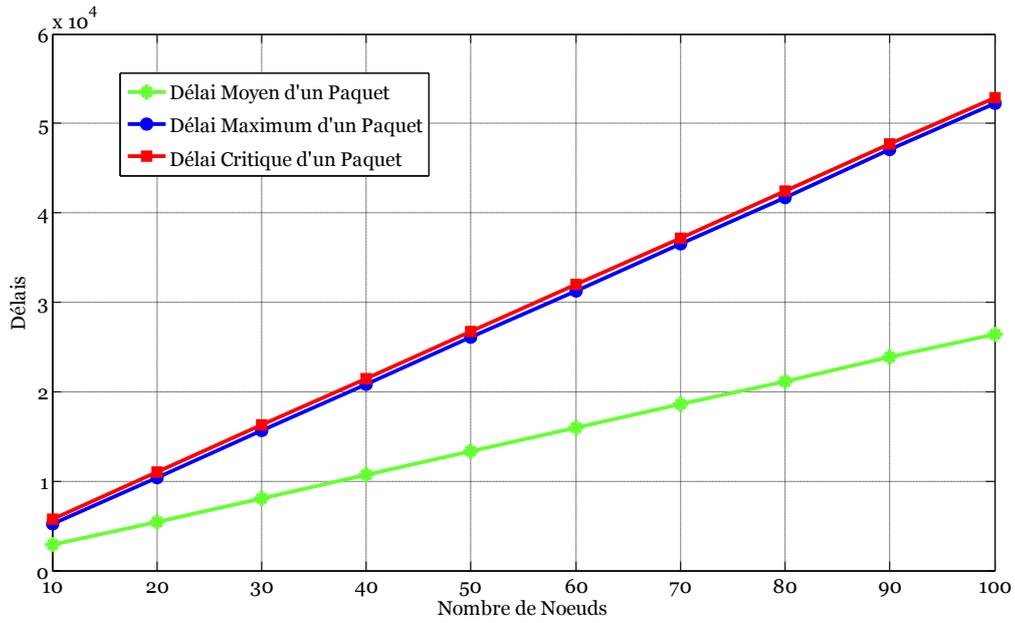
### **IV.3.3.2. Analyse des aptitudes temps réel du protocole RT-MAC**

Dans ce paragraphe, nous allons analyser les aptitudes temps réel de notre protocole RT-MAC et le valider sur le plan temporel. Pour commencer, nous allons présenter les résultats de simulation du protocole RT-MAC dans un environnement idéal (voir Figure IV.17 et Figure VI.18). Ensuite, nous allons considérer l'effet du canal radio sur les performances du protocole RT-MAC afin d'analyser son comportement vis-à-vis des garanties temps réel assurées par ce protocole au niveau liaison de données (voir Figure IV.19 et Figure IV.20).

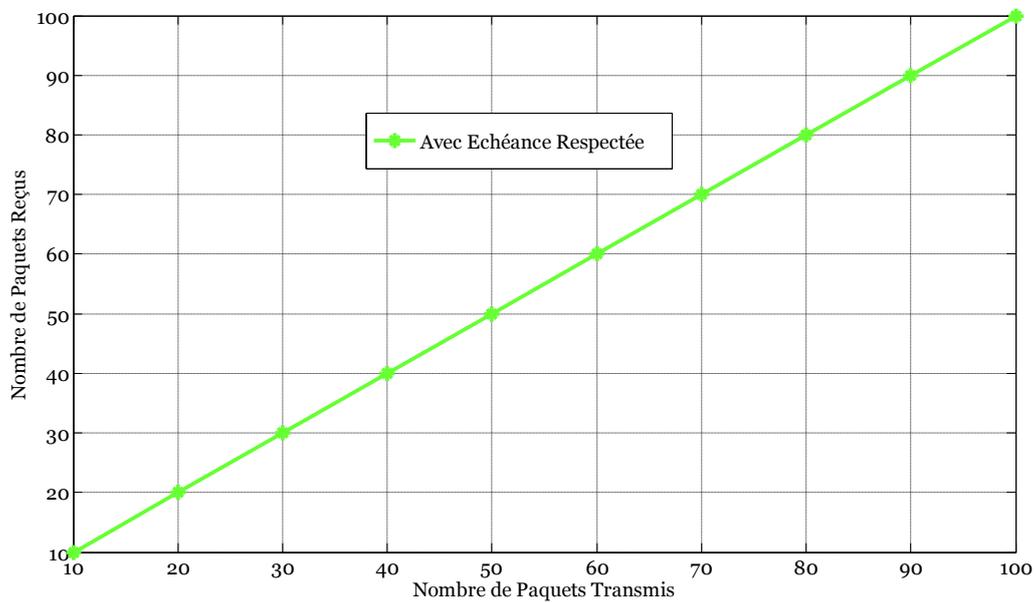
Dans les conditions idéales de propagation des ondes électromagnétiques (BER=0), nous avons simulé le protocole RT-MAC en faisant varier le nombre de nœuds dans le réseau de 10 à 100 tout en fixant la taille des paquets de données à 256 octets.

La figure IV.17 représente le temps moyen de réponse et le temps maximum de réponse, d'un paquet de données, obtenus avec notre protocole RT-MAC. Nous remarquons que le temps maximum de réponse est juste inférieur au délai critique de remise de messages temps réel. Sachant que cette métrique (temps maximum de réponse) représente le temps le plus lent de tous les paquets livrés durant le cycle de communication, ceci vaudrait dire que l'ensemble de tous les paquets envoyés et reçus correctement au niveau couche MAC, sera aussi reçu correctement au niveau couche application.

Effectivement, la figure IV.18 confirme cette conclusion sur la bonne réception des messages temps réel au niveau couche application. Cette figure montre que la totalité des paquets transmis sur le réseau sont tous reçus correctement sans perte ni dépassement d'échéance.

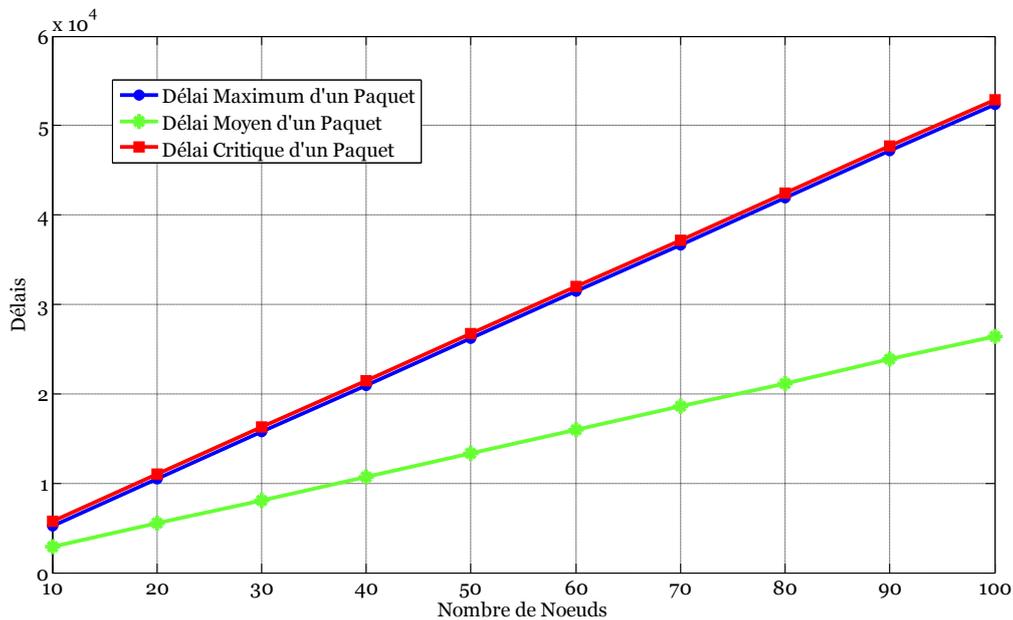


**Figure IV. 17 :** Délai Moyen et Maximum d'un paquet avec le protocole RT-MAC dans canal parfait.

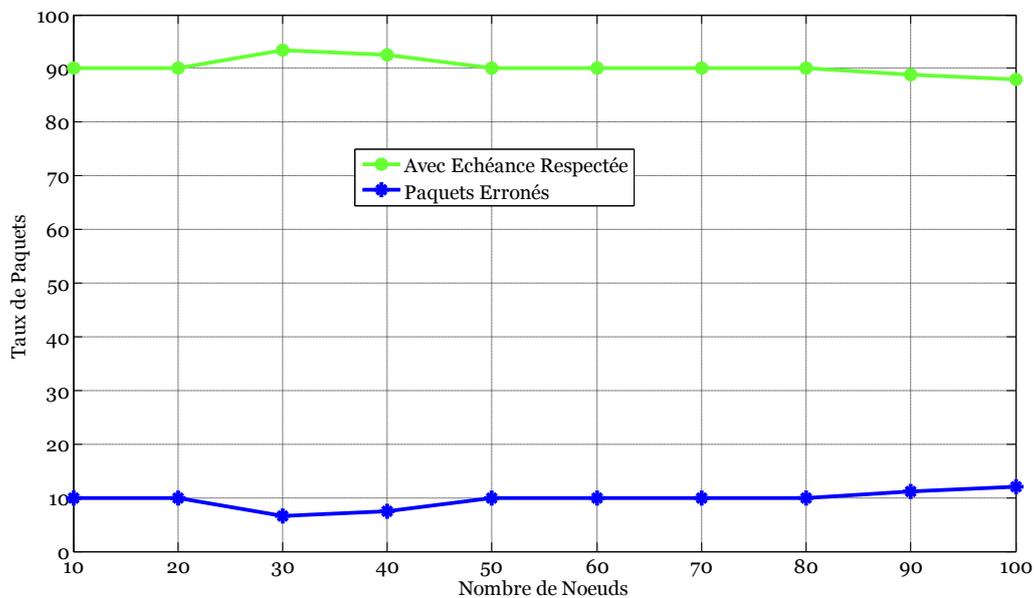


**Figure IV. 18 :** Nombre de paquet livrés avant leurs dates limites avec le protocole RT-MAC dans canal parfait.

A présent, nous montrons les résultats de simulation du protocole RT-MAC dans un environnement bruité ( $BER = 3.323 \times 10^{-5}$ ).



**Figure IV. 19 :** Délai Moyen et Maximum d'un paquet avec le protocole RT-MAC dans un canal bruité.



**Figure IV. 20 :** Taux de succès (paquets avec échéance respectée) et de perte (paquets erronés) avec le protocole RT-MAC dans un canal bruité.

La figure IV.19 représente le temps moyen de réponse et le temps maximum de réponse, d'un paquet de données, obtenus avec notre protocole RT-MAC. Nous remarquons que le temps maximum de réponse reste toujours inférieur au délai critique, malgré que des paquets aient été perdus sur le canal de transmission à cause du bruit. Le taux de paquets perdus et le taux de paquets arrivés avant leurs échéances, sont représentés sur la figure IV.20. Sur cette figure, nous remarquons qu'un pourcentage de paquets transmis sur le réseau est perdu mais cette perte de données n'a pas influencé les délais des paquets qui ont été livrés correctement au niveau couche MAC ; car avec notre protocole RT-MAC, un message temps réel perdu n'est pas retransmis.

#### **IV.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons proposé un protocole MAC temps réel (RT-MAC) destiné aux applications industrielles temps réel. Dans notre proposition de protocole d'accès au médium sans fil, nous avons apporté un certain nombre d'adaptations protocolaires dans la norme originelle IEEE 802.11 en se basant soit sur les lacunes des protocoles MAC des réseaux WLAN, soit sur les spécificités du domaine auquel notre proposition est destinée. L'évaluation de performances par simulation de notre protocole RT-MAC a montré son aptitude à être utilisé dans le domaine de l'automatique au dessous des applications de Contrôle-Commande d'un système de production.

## Conclusion générale

La technologie IEEE 802.11, avec ses différentes déclinaisons, est certainement le réseau local sans fil le plus populaire et le plus diffusé dans le monde. Le succès phénoménal rencontré par cette technologie dans le milieu du grand public, nous a motivé de prévoir son utilisation dans les systèmes industriels de production, où elle peut apporter ses avantages en termes de flexibilité, mobilité et réduction des coûts de câblage. Cependant, l'utilisation de cette technologie dans un milieu industriel nécessite d'assurer des garanties déterministes sur les délais de remise des messages contraints temporellement, générés par les applications industrielles. Dans ce mémoire de Magister, nous avons proposé des adaptations protocolaires à la norme originale des réseaux locaux sans fil IEEE 802.11, afin de rendre son utilisation possible dans les systèmes de production où les contraintes de temps sont fortes.

Pour arriver à proposer un protocole MAC temps réel qui soit en mesure de répondre aux exigences des applications industrielles temps réel, nous avons commencé par réaliser une étude sur les systèmes temps réel, les systèmes distribués temps réel et les réseaux de communication temps réel. Cette étude nous a permis de découvrir, comprendre et maîtriser les spécificités temporelles des systèmes temps réel. Ces systèmes sont caractérisés par des paramètres temporels (la périodicité ; nous parlons de tâches temps réel périodiques, apériodiques, sporadiques ou cycliques) et des contraintes qu'engendrent ces paramètres (la criticité ; nous parlons de tâches temps réel critiques, à contraintes dures ou strictes et de tâches non critique, à contraintes souples ou moues). La majorité des systèmes temps réel fonctionnent sous une architecture distribuée, où un réseau de communication interconnectant les différentes tâches distantes devra assurer des délais de communications bornés supérieurement au pire des cas, afin de préserver la cohérence globale de l'application distribuée temps réel. Nous avons constaté que ces

réseaux sont basés sur des supports de communication filaires, et des méthodes d'accès déterministes, garantissant ainsi l'attribut temps réel aux applications industrielles.

Nous avons ensuite réalisé une étude sur l'utilisation des réseaux sans fil dans les systèmes automatiques. Nous avons cité des applications dont l'utilisation d'un réseau sans fil pour interconnecter leurs composants s'avère incontournable. Ces applications concernent des domaines très variés du monde de l'automatique : l'aéronautique où le câblage pose des contraintes de lourdeur, la robotique mobile où un réseau filaire limite la liberté d'action des mobiles, ... . Nous nous sommes attardés sur les systèmes de production. Nous avons recensé les problèmes liés à l'utilisation des technologies de communications industrielles filaires. Nous avons par conséquent argumenté et donné les motivations et les avantages qu'apportent la mise en œuvre d'un réseau sans fil, pour permettre une bonne connectique des appareils vibratoires, réduction des coûts de câblage et ouverture du réseau industriel sur le réseau d'entreprise et sur le réseau internet

Aujourd'hui, différentes technologies de communication sans fil sont disponibles. Dans ce mémoire, nous avons tenté de donner une présentation de ces réseaux sans fil à travers une classification basée sur la portée de communication (WPAN, WLAN, WMAN et WWAN). Dans notre description, nous nous sommes focalisés sur les différentes déclinaisons des réseaux WLAN IEEE 802.11 ; en effet c'est sur ce type de réseau que sont basés nos travaux de mémoire. Nous nous sommes penchés par la suite sur la problématique de transmission dans les réseaux sans fil. Certes, ces réseaux permettent de gagner sur les aspects cités ci-dessus. Cependant, le médium immatériel qui les caractérise empêche la transposition des mécanismes et méthodes connus dans le bus filaire au sans fil. Nous avons décortiqué cette problématique à deux niveaux. Le premier concerne de la forte variabilité des caractéristiques du médium radio. La couche physique pose des problèmes de transmissions dues aux phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques. Le second concerne de la couche MAC des réseaux sans fil, qui sont pour la plupart conforme au standard IEEE 802.11, basé sur un protocole d'accès au médium aléatoire (CSMA/CA), conduisant ainsi à l'apparition du phénomène de collisions.

Dans ce mémoire de Magister, nous avons apporté des modifications dans la norme originale IEEE 802.11, afin de rendre l'utilisation de cette technologie possible

dans un milieu industriel. Les adaptations protocolaires que nous avons proposées permettent de fiabiliser les communications au niveau couche liaisons de données, c'est-à-dire assurer des délais de livraisons bornés supérieurement au pire des cas pour les communications qui peuvent se dérouler avec succès au niveau couche liaisons de données. A cet effet, nous avons proposé le protocole RT-MAC, qui introduit des mécanismes et des fonctionnalités nouvelles, en se basant (dans notre raisonnement) sur les propriétés des systèmes distribués temps réel et sur les imperfections identifiées dans les protocoles standards ou les nouvelles propositions qui ont introduit de la qualité de service dans la couche MAC des réseaux WLAN.

L'évaluation de performance du protocole RT-MAC et la validation de ses aptitudes temps réel vis-à-vis des contraintes des applications industrielles ont été effectuées par simulation à l'aide de notre outil WNS-RTIA. Les résultats de simulation montrent d'une part, l'inadaptabilité du protocole MAC IEEE 802.11 à livrer les messages temps réel avant leurs dates critiques autorisées par l'application temps réel. Nous avons constaté que le nombre de messages rejetés par l'application à cause du dépassement d'échéance augmente avec l'insertion de nouveaux nœuds dans le réseau. Plus des nœuds s'ajoutent, plus le nombre de collisions augmente d'une manière proportionnelle. Ainsi, pour y remédier, le mécanisme de retransmission est alors activé pour recouvrir les paquets qui ont subi un échec de transmission. Les retransmissions des paquets collisionnés conduisent à la prolongation des délais des paquets en cours de service et au retardement de livraison des paquets en attente d'être servis. Par contre, avec RT-MAC, nous avons constaté le respect des dates de livraison des messages temps réel, quel que soient les conditions physiques de transmission ; indépendamment de la variabilité des caractéristiques du médium radio. Les messages temps réel, dont la transmission a été effectuée correctement de point de vue MAC, sont toujours livrés avant leurs dates critiques ; c'est-à-dire reçus correctement du point de vue application. Nous pouvons donc dire que notre protocole MAC temps réel RT-MAC assure la fiabilité des communications temps réel au niveau liaisons de données.

Dans la continuité de nos travaux de mémoire de Magister, nous proposons les perspectives suivantes :

- Amélioration de notre proposition par l'intégration d'algorithmes d'ordonnancement de tâches temps réel connus dans les architectures

monoprocasseur pour ordonnancer les messages temps réel qui transitent sur la ressource radio ;

- Validation des aptitudes temps réel de notre protocole RT-MAC par une approche analytique (réseaux de Pétri) ;
- Comparaison du protocole RT-MAC avec les autres protocoles MAC des réseaux WLAN (PCF du 802.11, EY-NPMA de HiperLAN-1 et TDMA dynamique de HiperLAN-2) ;
- Comparaison du protocole RT-MAC avec les protocoles des réseaux temps réel (en particulier le protocole CAN et Profibus).

## Bibliographie

- [1] J. P. ELLOY. *Systèmes réactifs synchrones et asynchrones*. In Applications, Réseaux et Systèmes, pp 43–51, Septembre 1997.
- [2] P. RICHARD, F. COTTET, et C. KAISER. *Précédences généralisées et ordonnançabilité des tâches de suivi temps réel d'un laminoir*. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Volume 35 (9), pp. 1055–1071, 2001.
- [3] C. KAISER et G. STOFFEL. *Système d acquisitions et d analyse en temps réel des signaux d un laminoir*. Rapport scientifique, CEDRIC, CNAM, Paris 1999.
- [4] C. KAISER. *Description et critique d'un système temps réel pour le suivi d un Laminoir : Robustesse et potentiel d'évolutivité*. Hermès Science, Volume 20(1), 1901.
- [5] F. COTTET, J. DELACROIX, C. KAISER, et Z. MAMMERI. *Ordonnancement Temps Réel*. Hermès Edition, 2000.
- [6] D. ISOVIC, G. FOHLER, and L. STEFFENS. *Real-time issues of mpeg-2 layout in resource constrained systems*. International Journal on Embedded Systems, Volume 6, pp. 1740-1760, 2004.
- [7] J. A. STANKOVIC. *Misconception about real-time computing*. In IEEE Computer Magazine, Volume 10, pp. 0–19, 1988.
- [8] G.D.R.T.R. CNRS. *Le temps réel*. Technique et Science Informatiques, 1988.
- [9] M. ALABAU and T. DECHAIZE. *Ordonnancement temps réel par échéance*. In T.S.I, Volume 11, 1992.

- 
- [10] H. HANSSON, M. SJODIN, and K. TINDELL. *Guaranteeing real-time traffic through an ATM network*. IEEE Computer Society Press, volume 5, pp. 44–53, Janvier 1997.
- [11] D. ISOVIC, G. FOHLER, and L. STEFFENS. *Timing constraints of mpeg-2 decoding for high quality video: misconceptions and realistic assumptions*. In Proceedings of the 15th Euromicro Conference on Real-Time Systems, Juin 2003.
- [12] S. PAILLER. *Analyse Hors Ligne d'Ordonnabilité d'Applications Temps Réel comportant des Tâches Conditionnelles et Sporadiques*. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, Université de Poitiers, Octobre 2006.
- [13] F. V. CARVALHO. *Sur l'intégration de mécanismes d'ordonnement et de communication dans la sous-couche MAC des réseaux locaux temps-réel*. Thèse de doctorat, Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1996.
- [14] S. MARTIN. *Maîtrise de la dimension temporelle de la qualité de service dans les réseaux*. Thèse de Doctorat, Université Paris XII, Juillet 2004.
- [15] N. BERGE. *Modélisation au moyen des réseaux de Pétri temporisés stochastiques d'une application de contrôle-commande de poste de transformation d'énergie électrique répartie sur le réseau de terrain FIP*. Thèse de Doctorat, Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse, Mai 1996.
- [16] J. F. GUILLAUD. *Architectures distribuées temps réel fondées sur ATM*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Octobre 1995.
- [17] L. BADIS. *Ordonnement hors-ligne des tâches temps réel à contraintes strictes à l'aide des colonies de fourmis en environnement multiprocesseur*. Mémoire de Magister, I.N.I Institut National d'Informatique Oued-Smar, Alger, Algérie, Juillet 2008.
- [18] G. GALLOT. *Modélisation Dynamique et Commande d'un robot Anguille*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 2007.
- [19] J. F. DEVERGE. *Contributions à l'analyse du comportement temporel de la hiérarchie mémoire pour l'estimation du pire temps d'exécution*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, Juillet 2008.

- 
- [20] M. E. M. BEN-GAID. *Ordonnancement et contrôle optimal des systèmes temps-réel répartis*. Thèse de Doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne, Novembre 2006.
- [21] A. BOULMERKA. *Adaptation des méta-heuristiques à l'ordonnancement hors-ligne des tâches temps réel à contraintes strictes en environnement monoprocesseur*. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure d'Informatique (E.S.I) Oued-Smar, Alger, Algérie, Avril 2009.
- [22] J. BARRE. *Architectures multi-flots simultanés pour le temps-réel strict*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Décembre 2008.
- [23] C. BURGUIERE. *Modéliser la prédiction de branchement pour le calcul de temps d'exécution pire-cas*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Juin 2008.
- [24] T. ROBERT. *Détection d'erreur au plus tôt dans les systèmes temps-réel une approche basée sur la vérification en ligne*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Juin 2009.
- [25] H. CHARARA. *Evaluation des performances temps réel de réseaux embarques avioniques*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 06 Novembre 2007.
- [26] B. FONTAN. *Méthodologie de conception de systèmes temps réel et distribués en contexte UML/SysML*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Janvier 2008.
- [27] B. BRAHIMI. Proposition d'une approche intégrée basée sur les réseaux de Pétri de Haut Niveau pour simuler et évaluer les systèmes contrôlés en réseau. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2007.
- [28] E. WITRANT. *Stabilisation des systèmes commandés par réseaux*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2007.
- [29] G. C. WALSH, H. YE and L. BUSHNELL. *Stability analysis of networked control systems*. Proceedings of the 1999 American control conference, Volume 4, pp. 2876-2880, 1999.
- [30] J. W. O. OVERSTREET and A. TZES. *An Internet-based real-time control engineering laboratory*. IEEE control systems Magazine, volume 5 (19), pp. 19-34, 1999.

- [31] Y. TIPSUWAN and M. Y. CHOW. *Networked-based controller adaptation based on QoS negotiation and deterioration*. The 27<sup>th</sup> annual conference of the IEEE industrial electronics society (IECON 99), Volume 3, pp. 1271-1276, 2001.
- [32] Y. TIPSUWAN and M. Y. CHOW. *Gain adaptation of networked mobile robot to compensate QoS deterioration*. The 28<sup>th</sup> annual conference of the IEEE industrial electronics society (IECON 02), Volume 4, pp. 3146-3151, 2002.
- [33] T. J. TARN AND N. XI. *Planning and control of internet-based téléopération*. Proceedings of SPIE: Telem manipulator and telepresence technologies, Volume 3524, pp. 189-193, Boston, 1998.
- [34] J. GALDUN, R. GHOSTINE, J. M. THIRIET, J. LIGUS and J. SARNOVSKY. *Definition and modelling of the communication architecture for the control of a helicopter-drone*. 8<sup>th</sup> IFAC Symposium on cost oriented automation, Habana (Cuba), Février 2007.
- [35] W. ZHANG, M. S. BRANICKY and S. M. PHILIPS. *Stability of networked control systems*. IEEE Control systems Magazine, Volume 1 (21), pp. 84-99, 2001.
- [36] F. L. LIAN. *Analysis, Design, Modelling, and control of Networked control Systems*. Ph.D dissertation, University of Michigan, 2001.
- [37] J. F. LEE, W. LIAO and M. C. CHEN. *A differentiated service model for enhanced distributed channel access (EDCA) of IEEE 802.11e WLANs*. Mobile Networks and Applications, Volume 12, pp. 69-77, 2007.
- [38] R. GHOSTINE. *Influence des fautes transitoires sur la fiabilité d'un système commandé en réseau*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Juin 2008.
- [39] E. WITRANT. *Stabilisation des systèmes commandés par réseaux*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2007.
- [40] A. MIFDAOUI. *Spécification et validation d'un réseau de communication de type Ethernet Commuté pour systèmes avioniques militaires de nouvelles générations*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, N° d'ordre 2575, Décembre 2007.
- [41] J. GRIEU. *Analyse et évaluation de techniques de commutation Ethernet pour l'interconnexion des systèmes avioniques*. Thèse de Doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Septembre 2004.

- 
- [42] J. P. GEORGES. *Systèmes contrôlés en réseau : Evaluation de performances d'architectures Ethernet commutées*. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, Novembre 2005.
- [43] ISO 7498. *Information Processing Systems, Open Systems Interconnection, Basic Reference Model*. 1984.
- [44] Z. MAMMERI. *Réseaux et Temps Réel - Ordonnancement de Messages*. Actes de l'Ecole d'Eté Temps réel, Université de Poitiers, France, pp. 62-79, Septembre 1997.
- [45] International Standard Organization. *Road Vehicles - Low Speed Serial Data Communication- Part2: Low-Speed Controller Area Network (CAN)*. ISO 11519-2, 1994.
- [46] T. KORAKIS and L. TASSILIULAS. *Providing quality of service guarantees in wireless LANs compliant with 802.11e*. Computer Networks, volume 47 (2), pp. 239-255, 2005.
- [47] K. C. SEVCIK and M. J. JOHNSON. *Cycle time properties of the FDDI token ring protocol*. IEEE Transactions on Software Engineers, Volume 13(3), pp. 376-385, 1987.
- [48] H. KOPETZ, A. DAMM, C. KOZA, M. MULAZZANI, W. SCHWABL, C. SENFT and R. ZAINLINGER. *Distributed Fault-Tolerant Real Time Systems: The MARS Approach*. IEEE MICRO, Février 1989.
- [49] S. MANN. *Smart Clothing : The Shift to Wearable Computing*. Commun, ACM, Volume 39(8), pp. 23-24, 1996.
- [50] T. KHOUTAIF. *Etude et modélisation des liens asynchrones Bluetooth pour une architecture de systèmes temps réel communicants*. Thèse de Doctorat, 2007.
- [51] T. VAL. *Contribution à l'ingénierie des systèmes de communication sans fil*. Thèse de HDR, 2002.
- [52] IEEE Computer Society. *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless personal area networks (WPANs)*. IEEE Computer Society, 2005.
- [53] Bluetooth SIG. *Bluetooth Specification Version 2.1 + EDR*. Bluetooth SIG, 2007.

- [54] IEEE Computer Society. *Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. IEEE Computer Society, 2003.
- [55] IEEE Computer Society. *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. IEEE Computer Society, 2006.
- [56] A. V. D. BOSSCHE. *Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles*. Thèse de doctorat, Laboratoire LATTIS EA 4155 (Groupe SCSF : Systèmes Communicants Sans Fil), Université de Toulouse II, Juillet 2007.
- [57] N. FOURTY. *Contribution à l'ingénierie du réseau sans fil WiMAX pour des applications audio d'aide au handicap et aux personnes âgées*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse II, Septembre 2008.
- [58] N. NASRI. *Etude et caractérisation électronique et protocolaire de modules RFID dédiés à une communication en milieu aquatique*. Thèse de Doctorat, 2008.
- [59] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition.
- [60] IEEE Computer Society and IEEE Microwave Theory and Techniques Society. *802.16 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks: part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*. IEEE Std 802.16, Octobre 2004.
- [61] ETSI Project Broadband Radio Access Networks. *Broadband Radio Access Networks (BRAN): HiperMAN Physical (PHY) Layer*. ETSI Technical Specification ETSI, Volume 1.3.1, pp. 102-177, Février 2006.
- [62] ETSI Project Broadband Radio Access Networks. *Broadband Radio Access Networks (BRAN): HiperMAN Data Link Control (DLC) Layer*. ETSI Technical Specification ETSI, Volume 1.3.2, pp. 102-178, Mars 2006.
- [63] Le site web de l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute), <http://www.etsi.org>.
- [64] Le site web du comité de standardisation IEEE 802 (IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee) : <http://www.ieee802.org>.

- [65] D. A. Howe. *Ku-band Satellite Two-Way Timing Using a Very Small Aperture Terminal (VSAT)*. 41<sup>st</sup> Annual Symposium on Frequency Control, pp. 149-160, 1987.
- [66] S. A. SMERZI, G. GIRLANDO, T. COPANI and G. PALMISANO: « *A Ku-band monolithic receiver for DVB-S applications*. IEEE Communications Magazine, Volume 42 (8), pp. 132-139, Août 2004.
- [67] M. YAZID, L. ZIANE-KHOJA. *Analyse des performances du Standard IEEE 802.11 mode Ad hoc dans un environnement Radio : de la modélisation analytique à la simulation*. Mémoire de fin d'études, Université Abderrahmane Mira, Béjaïa, 2007-2008.
- [68] E. CONCHON. *Définition et mise en œuvre d'une solution d'émulation de réseaux sans fil*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre 2007.
- [69] R. REZGUI. *Etude et Proposition de Techniques de Migration optimale de Réseaux GSM vers l'UMTS*. Mémoire de fin d'études, 2004/2005.
- [70] Site web du laboratoire CRAN : <http://www.cran.uhp-nancy.fr/>
- [71] V. BOMPART. *Optimisation non lisse pour la commande des systèmes de l'Aéronautique*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, Novembre 2007.
- [72] H. CHARARA. *Evaluation des performances temps réel de réseaux embarqués avioniques*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Novembre 2007.
- [73] S. GAUDAN. *Management des risques de fautes de conception liées aux technologies orientées objet pour leur utilisation dans les applications avioniques critiques*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Novembre 2007.
- [74] N. NAVET. *Les réseaux temps réel embarqués dans les véhicules*. Chapitre 10 publié dans *Systèmes temps réel 2 - Ordonnancement, réseaux et qualité de service*, 2006.
- [75] P. CASTAGNA. *Contribution à la modélisation, la simulation et la commande de systèmes de production et de transitique*. Thèse de HDR, Institut de recherche en communications et cybernétique de Nantes, Décembre 2004.

- [76] A. SUBIAS. *Contribution au diagnostic des systèmes complexes*. Thèse de HDR, Université Paul Sabatier, Toulouse, Septembre 2006.
- [77] A. SEGUY. *Décision Collaborative dans les systèmes distribués : Application à la E-maintenance*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Décembre 2008.
- [78] D. RACOCEANU. *Contribution à la surveillance des Systèmes de Production en utilisant les Techniques de l'Intelligence Artificielle*. Thèse de HDR, Université de Franche-Comté, Besançon, Janvier 2006.
- [79] Projet Dynamite pour la e-maintenance : <http://osiris.sunderland.ac.uk>
- [80] W. ZARRAD. *Télé-opération avec retour d'effort pour la chirurgie mini-invasive*. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, Décembre 2009.
- [81] Y. RYBARCZYK. *Etude de l'appropriation d'un système de téléopération dans l'optique d'une Coopération Homme-Machine*. Thèse de Doctorat, Université d'Evry, Val d'Essonne, Mars 2004.
- [82] J. GANCET. *Systèmes multi-robots aériens : Architecture pour la planification, la supervision et la coopération*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, septembre 2005.
- [83] D. REYNDERS, S. MACKAY, E. WRIGHT. *Practical industrial data communications*. Newnes An imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803 First published 2005, ISBN 0 7506 6395 2.
- [84] S. CORSON and J. MACKER. *Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*. Internet Request for Comments RFC 2501, Internet Engineering Task Force (IETF), Janvier 1999.
- [85] L. BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE, N. KHOULALENE ET S. KACI. *Routing With Terminal Differentiation in Ad Hoc Network*. Proceedings of the International Conference MOAD'2007 (Decision Aid Methods and Tools), Bejaia, pp. 449-455; ISBN: 978-9947-0-1958-0, November 2007.
- [86] C. APOSTOLAS, R. TAFAZOLLI and B. G. EVANS. *Comparison between elimination yield non pre-emptive priority multiple access (EY-NPMA) and dynamic TDMA (D-TDMA)*. 7<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRCap096), volume 2, issue 15-18, pp 663-667, Octobre 1996.

- [87] J. WEINMILLER, M. SCHLAGER, A. FESTAG and A. WOLISZ. *Performance Study of Access Control in Wireless LANs: IEEE 802.11 DFWMAC and ETSI RES 10 HiperLAN*. Mobile Networks and Applications, Volume 2, pp. 55-67, 1997.
- [88] I. JABRI. *Gestion dynamique des topologies sans fils*. Thèse de Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy I, Novembre 2008.
- [89] N. C. TAHER. *Modélisation analytique et contrôle d'admission dans les réseaux 802.11e pour une maîtrise de la Qualité de Service*. Thèse de Doctorat, École Doctorale Sitevry, Université d'Evry, Mars 2009.
- [90] D. H. CANSEVER, A. M. MICHELSON, and A. H. LEVESQUE. *Quality of service support in mobile ad-hoc IP networks*. In MILCOM, pp. 30-34, 1999.
- [91] S. CHOI and K. G. SHIN. *A unified wireless LAN architecture for real-time and non-realtime communication services*. IEEE/ACM Transactions on Networking, Volume 8, pp 44-50, Février 2000.
- [92] I. AAD and C. CASTELLUCCIA. *Differentiation mechanisms for IEEE 802.11*. in Infocom, Anchorage (Alaska), pp. 209-218, 2001.
- [93] Y. KWON, Y. FANG, and H. LATCHMAN. *A novel MAC protocol with Fast Collision Resolution for Wireless LANs*. In INFOCOM, San Francisco, pp. 793-807, 2003.
- [94] W. PATTARA-ATIKOM, P. KRISHNAMURTHY, and S. BANERJEE. *Comparison of distributed fair QoS mechanisms in wireless LANs*. In GLOBECOM, San Francisco, pp. 553-557, 2003.
- [95] J. ZHAO, Z. GUO, Q. ZHANG, and W. ZHU. *Distributed MAC adaptation for WLAN QoS differentiation*. In GLOBECOM, San Francisco, pp. 3442-3446, 2003.
- [96] I. AAD, Q. NI, C. BARAKAT, and T. TURLETTI. *Enhancing IEEE 802.11 MAC in congested environments*. In ASWN, Boston, Massachusetts, pp. 82-91, 2004.
- [97] C. WANG, B. LI, and L. LI. *A new collision resolution mechanism to enhance the performance of IEEE 802.11 DCF*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 53 (4), pp. 1235-1246, Juilier 2004.
- [98] P. CHATZIMISIOS, and AL. *A simple and effective backoff scheme for the IEEE 802.11 MAC protocol*. In CITSA, Orlando, Florida, 2005.

- [99] S. POLLIN, A. MOTAMEDI, A. BAHAI, F. CATTHOOR, and L. VAN-DER-PERRE. *Delay improvement of IEEE 802.11 distributed coordination function using size-based scheduling*. In ICC, Seoul, pp. 3484-3488, 2005.
- [100] J. CHOI, J. YOO, S. CHOI, and C. KIM. *EBA: an enhancement of the IEEE 802.11 DCF via distributed reservation*. IEEE Transactions on Mobile Computing, Volume 4 (4), pp 378-390, Juillier 2005.
- [101] N. H. VAIDYA, P. BAHL and S. GUPTA. *Distributed Fair Scheduling in a wireless LAN*. 6<sup>th</sup> Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2000), Boston, pp. 167-178, Août 2000.
- [102] A. VERES, A. CAMPBELL, M. BARRY and L. SUN. *Supporting service differentiation in Wireless packet networks using distributed control*. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, special issue on mobility and resource management in next generation wireless systems, Volume 19(10), pp. 2094-2104, 2001.
- [103] I. AAD and C. CASTELLUCCIA. *Differentiation mechanisms for IEEE 802.11*. IEEE INFOCOM, Alaska, USA, pp. 209-218, 2001.
- [104] I. AAD and C. CASTELLUCCIA. *Priorities in WLANs*. Computer networks, Volume 41 (4), pp. 505-526, 2003.
- [105] J. DENG and R. CHANG. *A priority Scheme for IEEE 802.11 DCF access method*. IEICE Transactions in Communications, pp. 96-102, 1999.
- [106] J. Yu. *IEEE 802.11e QoS for Wireless LAN: A Research Direction*. Multimedia Networking Research Laboratory (MNLAB) Networking Seminar, Décembre 2003.
- [107] J. A. GARCIA-MACIAS, F. ROUSSEAU, G. BERGER-SABBATEL, L. TOUMI et A. DUDA : « *Différenciation des services sur les réseaux sans fil 802.11*. 9<sup>ième</sup> Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles, Montréal, Québec, Mai 2002.
- [108] S. CHOI, J. DEL PRADO, S. SHANKAR and S. MANGOLD. *IEEE 802.11e Contention-Based Channel Access (EDCF) Performance Evaluation*. IEEE International Conference on Communications, Volume 2, pp. 1151-1156, Mai 2003.
- [109] J. R. GALLARDO, P. MEDINA and W. ZHUANG. *QoS mechanisms for the MAC protocol of IEEE 802.11 WLANs*. Wireless Networks, Volume 13, pp. 335-349, 2007.

- [110] M. HEGDE, S. ANAND, A. KUMAR and J. KURI. *WLAN manager (WM) : a device for performance management of a WLAN*. International Journal of Network Management, Volume 17, pp. 155-170, 2007.
- [111] M. LI and B. PRABHAKARAN. *MAC layer admission control and priority re-allocation for handling QoS guarantees in non-cooperative wireless LANs*. Mobile Networks and Applications, Volume 10 (6), pp. 947-959. 2005.

# Résumé

De nos jours, les technologies de réseaux sans fil (WLAN/WPAN) présentes sur le marché sont nombreuses et globalement complémentaires. Cependant, trop peu d'entre elles proposent de réelles garanties sur la remise de messages dans un temps borné alors que ces exigences sont fondamentales dans le cadre d'une utilisation de type industriel. Dans le cadre de nos travaux, nous proposons un protocole MAC temps réel dans les réseaux locaux sans fil IEEE 802.11, présentant des garanties sur le plan temporel pour les applications industrielles temps réel.

Tout d'abord, une étude est réalisée sur les systèmes distribués temps réel en vue d'identifier leurs paramètres temporels et les contraintes qu'ils engendrent. Puis, un état de l'art est présenté sur les principaux réseaux sans fil existants, les mécanismes de gestion de la Qualité de Service et les méthodes d'accès généralement utilisées. Nous présentons ensuite la technologie IEEE 802.11 sur laquelle sont basés nos travaux. Cette étude approfondie nous a permis d'identifier certaines imperfections au niveau de la méthode d'accès par rapport aux contraintes temporelles. Nous proposons de combler ces insuffisances par la proposition d'un protocole MAC temps réel (RT-MAC) dont nous présentons les caractéristiques et les nouvelles fonctionnalités. L'évaluation de performances et la validation de notre protocole RT-MAC sur le plan temporel sont effectuées par simulation à l'aide de notre outil WNS-RTIA. Les résultats de simulation obtenus nous ont permis de statuer sur l'efficacité de notre protocole.

**Mots clés** : Systèmes distribués temps réel, Réseaux sans fil IEEE 802.11, Protocoles MAC, Qualité de service temporelle, Simulation.

# Abstract

Nowadays, wireless network technologies (WLAN/WPAN) available on the market are numerous and complementary. Nevertheless, none of these technologies present some real guaranties on message delivery within a bounded delay. However, this kind of constraint is a recurrent need in the industrial communication application context. To solve this problem, our research work proposes an original real time MAC protocol in MAC layer of IEEE 802.11 Wireless Local Area Network, designed for real time industrial applications.

We first identify parameters and temporal constraints of real time distributed systems. Then, we present a state of the art on principal wireless network standards and technologies, Quality of Service protocols and commonly used Medium Access Control mechanisms. After that, we present the IEEE 802.11 wireless technology which is used as a basis for our works. This study has enabled us to identify weakness in 802.11 Medium Access Control, in particular for highly time-constrained data transports. Our research works propose to solve these identified weaknesses by proposing an original real time medium access method (RT-MAC). Performance evaluation and validation of our RT-MAC protocol, has done by simulation under our tool WNS-RTIA. The obtained simulation results allowed to prove the efficiency of our protocol.

**Keywords**: Distributed real time systems, IEEE 802.11 wireless network, MAC protocols, Temporal quality of service, Simulation.