



Analyse et dimensionnement de réseaux hétérogènes embarqués

Abdelaziz Ahmed-Nacer

► To cite this version:

Abdelaziz Ahmed-Nacer. Analyse et dimensionnement de réseaux hétérogènes embarqués. Autre [cs.OH]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2018. Français. NNT : 2018INPT0026 . tel-04199522

HAL Id: tel-04199522

<https://theses.hal.science/tel-04199522>

Submitted on 7 Sep 2023

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

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



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Réseaux, Télécommunications, Systèmes et Architecture

Présentée et soutenue par :

M. ABDELAZIZ AHMED NACER

le vendredi 9 mars 2018

Titre :

Analyse et dimensionnement de réseaux hétérogènes embarqués

Ecole doctorale :

Mathématiques, Informatique, Télécommunications de Toulouse (MITT)

Unité de recherche :

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

Directeur(s) de Thèse :

M. CHRISTIAN FRABOUL

M. JEAN-LUC SCHARBARG

Rapporteurs :

M. EMMANUEL GROLLEAU, ENSMA POITIERS

M. FRANK SINGHOFF, UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Membre(s) du jury :

M. FRANK SINGHOFF, UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE, Président

M. CHRISTIAN FRABOUL, INP TOULOUSE, Membre

M. JEAN-LUC SCHARBARG, INP TOULOUSE, Membre

Mme KATIA JAFFRES-RUNSER, INP TOULOUSE, Membre

Mme XIAOTING LI, ECOLE CENTRALE D'ELECTRONIQUE, Membre

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement mes directeurs de thèse, Christian Fraboul et Jean-Luc Scharbarg pour le temps qu'ils m'ont accordé. Je remercie également Katia Jaffrès-Runser ma co-encadrante et amie pour son enthousiasme. Tu as su me donner les bonnes directions à suivre et tu as été disponible lors des moments clés.

Je suis aussi très reconnaissant envers messieurs Emmanuel Grolleau, professeur à l'ISAE-ENSMA Poitiers et Frank Singhoff professeur à l'Université de Bretagne Occidentale qui ont réalisé des rapports de thèse particulièrement complets et instructifs. Je remercie également madame Xiaoting Li enseignante à l'École centrale d'électronique Paris pour avoir pris le temps d'examiner mes travaux de thèse. Les commentaires lors des discussions qui ont suivi la soutenance étaient très constructifs.

Je remercie aussi l'ensemble du personnel du laboratoire IRIT que j'ai pu côtoyer. Je tiens à souligner tout particulièrement l'incroyable disponibilité de SAM, Annabelle et Muriel, les aides précieuses et orientations permanentes de Yamine qui a toujours su m'encourager dans les moments difficiles, les encouragements et les précieuses orientations d'ALB. Que vous en soyez tous remerciés. Je n'oublie pas également de souligner la bonne humeur de Manu, Riadh, Béatrice, Julien, Gentian, et la très bonne ambiance entretenue par les thésards JB, Nesrine, Eric, Cédric, Yoann, Oana, Dorin, Elie, Amal, etc... Je me souviendrais toujours du fabuleux bureau F404 grâce à Émilie, Samer et Santiago. Merci.

Je ne peux aussi oublier d'avoir une pensée pour Mehdi Anteur. Tu nous à quitté trop tôt. Repose en paix.

Ghada, Faiez, Alexendra, Moh, Manel, Abderahim, Mouna, Ghafour, Baha, JGK, Farou9 et Asma, je ne pourrais jamais vous remercier assez pour m'avoir autant soutenu et cru en moi.

Je réserve mon ultime remerciement à ma famille, mes parents et mes sœurs, qui m'ont amené à dépasser mes limites par leur soutien et leurs encouragements. Vous m'avez tant donné et avez participé activement à cet aboutissement. Merci d'avoir toujours été là pour moi, je vous dois tout.

Résumé

Avec l'apparition des nouvelles technologies de communication, le nombre des systèmes embarqués avioniques et automobiles est en constante augmentation. La gestion des communications entre ces systèmes devient alors de plus en plus complexe à mettre en œuvre dans un contexte où les contraintes temporelles et environnementales sont très fortes et où le taux d'échanges de messages est en augmentation continue.

L'utilisation optimale des réseaux pour acheminer les données tout en respectant les contraintes temporelles imposées est essentielle du point de vue de la sûreté de fonctionnement. Historiquement, pour répondre aux problématiques d'efficacité et de sûreté, les industriels ont développé une palette de réseaux embarqués dédiés à leurs applications cibles (CAN, LIN, ...). Ces réseaux présentaient des débits relativement faibles à un moment où un besoin croissant en bande passante se faisait ressentir. Le choix d'utiliser le concept de composants dit 'sur étagères' (off the shelf COTS) permettait alors de pallier ce nouveau besoin.

Dans un souci de conservation des capacités des réseaux à garantir les contraintes temporelles imposées par les systèmes embarqués temps réel, les industriels ont dû adapter ce concept de composants sur étagères aux systèmes embarqués. L'intérêt de l'utilisation de ces composants est un gain non négligeable en bande passante et en poids pour des coûts de développements relativement faibles. L'introduction de ces composants nouveaux s'est faite de telle sorte que leur impact sur les standards préexistants et les systèmes connectés soit minimal. C'est ainsi que les réseaux dit 'hétérogènes' ont vu leur apparition. Ces réseaux constituent une hybridation entre les technologies embarquées historiques et les composants sur étagère. Ils consistent en des réseaux d'extrémité utilisant des technologies éprouvées (telles que le CAN) interconnectés via des passerelles à un réseau fédérateur (backbone) utilisant des composants sur étagères.

Dès lors, le défi majeur à relever lors de l'utilisation d'un réseau fédérateur est de respecter les contraintes temporelles des applications sollicitant les différents réseaux. L'objectif est mis à mal sur les points d'interconnexion des réseaux hétérogènes (Passerelles). Ainsi l'approche principale utilisée pour le passage d'un réseau à un autre est

l'encapsulation de trames. Pour atteindre l'optimalité de performance de cette technique plusieurs paramètres sont à prendre en compte tels que le nombre de trames à encapsuler, les ordonnancements utilisés, le coût en bande passante ainsi que l'impact sur les distributions de délais (gigue).

Dans l'optique de préservation des performances des réseaux, l'objet de nos travaux porte sur l'étude, la comparaison et la proposition de techniques permettant l'interconnexion de réseaux hétérogènes temps réels à la fois pour des applications à faibles et à fortes contraintes temporelles. Après un état de l'art sur les réseaux temps réel, nous spécifions différentes techniques d'interconnexion de réseaux hétérogènes, puis, nous présentons une étude de cas basée sur une architecture réseau interconnectant différents bus CAN via un réseau fédérateur sans fil Wi-Fi. L'étude que nous avons menée montre, par le biais de différentes simulations, que cette architecture réseau est une bonne candidate pour la transmission de flux à contraintes temporelles faibles. Une architecture réseau interconnectant différents bus CAN via un réseau fédérateur Ethernet commuté est ensuite considérée dans une seconde étude de cas ciblant les applications à fortes contraintes temporelles. Dans un premier temps, nous prenons en compte le cas d'un réseau fédérateur Ethernet-PQSE et, dans un second temps, le cas d'Ethernet-AVB. Cette étude nous permet de montrer l'impact des différentes techniques d'interconnexion sur les délais des flux du réseau.

Abstract

With the emergence of new communication technologies, the number of avionics and automotive embedded systems is constantly increasing. The management of communications between these systems becomes increasingly complex to implement in a context where temporal and environmental constraints are very strong and where messages exchange rate is continuously increasing.

The optimal use of networks to transmit data while fulfilling the imposed temporal constraints is essential from a safety point of view. Historically, in order to address safety and efficiency issues, manufacturers have developed a range of embedded networks dedicated to their target applications (CAN, LIN, ...). These networks have relatively low bit rates at a point of time where a growing need for bandwidth was felt. To overcome this new need, the choice of using the concept of so-called 'off-the-shelf' components (COTS) has been made.

In order to preserve the networks abilities to guarantee the temporal constraints imposed by the real time embedded systems, manufacturers had to adapt the concept of off-the-shelf components to embedded systems. The benefits of using these components is a non-negligible gain in bandwidth and weight for relatively low development costs. The introduction of these new components has been made in such a way that their impact on pre-existing standards and connected systems is minimal. thereby, so-called 'heterogeneous' networks have emerged. These networks are a hybridization of historical embedded technologies and off-the-shelf components. They consist of stub networks using proven technologies (such as CAN) interconnected via gateways to a backbone network using off-the-shelf components.

Thus, the major challenge while using a heterogeneous network is to respect the temporal constraints of the applications requesting the different parts of the networks. This objective can be damaged at the interconnection points of the heterogeneous networks (Gateways). The main used approach to pass frames from one network to another is the encapsulation. To achieve the optimum performances of this technique, several parameters have to be considered such as the number of frames encapsulated, the used scheduling policy, the bandwidth cost as well as the impact on delay distributions (jitter).

In order to preserve networks performances, the aim of our work is to study, compare and propose techniques enabling the interconnection of real-time heterogeneous networks for application with both soft and hard temporal constraints.

After a state of the art on real-time networks, we have specified different techniques for the interconnection of heterogeneous networks, then we have presented a case study based on a network architecture interconnecting different CAN buses via a wireless backbone network (Wi-Fi). The study we conducted shows, through various simulations, that this network architecture is a good contender for the transmission of flows with soft temporal constraints. A network architecture interconnecting different CAN busses via a switched Ethernet backbone is considered in a second case study targeting applications with hard temporal constraints. Two different Ethernet backbone networks are taken into account. We studied first, the case of a switched Ethernet-PQSE backbone network. Then the case of a switched Ethernet-AVB backbone was considered. This study enabled us to highlight the impact of the different used interconnection techniques on network flows delays.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	v
Table des matières	vii
Table des figures	xi
Liste des tableaux	xiii
Liste des acronymes	xv
1 Introduction	1
2 Évolution des technologies de réseaux embarquées	5
2.1 Les débuts de l'électronique embarquée	5
2.2 Les bus et réseaux partagés spécifiques	7
2.2.1 Principales technologies automobiles	7
2.2.1.1 Controller Area Network (CAN)	7
2.2.1.2 Local Interconnect Network (LIN)	11
2.2.1.3 FlexRay	13
2.2.2 Principales technologies avions	14
2.2.2.1 ARINC 429	14
2.2.2.2 ARINC 629	15
2.3 Les réseaux Ethernet temps réel	16
2.3.1 Ethernet Commuté	16
2.3.2 ARINC 664 (AFDX)	18
2.3.3 Time Triggered Ethernet (TTE)	19
2.3.4 Audio Video Bridging (AVB)	21
2.3.4.1 Protocole de synchronisation	21
2.3.4.2 Politique de service des flux	22
2.3.4.3 Protocole de réservation de flux (SRP)	24

TABLE DES MATIÈRES

2.3.5	Time-Sensitive Networking (TSN)	25
2.3.5.1	Les standards liés à l'aspect trafic temps-réel	25
2.3.5.2	Les standards liés à l'aspect de redondance	26
2.4	Les réseaux sans-fil	26
2.4.1	Le standard IEEE 802.11 (WiFi)	28
2.4.1.1	Les normes IEEE802.11	29
2.4.1.2	La couche physique IEEE802.11	30
2.4.1.3	Vue d'ensemble de la couche MAC IEEE802.11	30
2.4.2	Bluetooth	32
2.4.3	Zigbee	34
2.5	Vers des architectures de communication hétérogènes	35
2.6	Conclusion	37
3	Architecture embarquée hétérogène	39
3.1	Objectifs d'une architecture embarquée hétérogène	39
3.2	État de l'art des architectures embarquées hétérogènes	40
3.2.1	Une interconnexion CAN-Flexray	40
3.2.2	Une interconnexion CAN-AFDX	40
3.2.3	Une interconnexion CAN-Ethernet(CSMA/CD)-CAN	41
3.3	Présentation de l'architecture considérée	42
3.3.1	Architecture générale	42
3.3.2	Flux	43
3.4	Délai de bout en bout d'une trame	45
3.5	Stratégies de passerelle	46
3.5.1	La passerelle d'entrée	47
3.5.1.1	Une trame pour une trame CAN	49
3.5.1.2	Une trame pour N trames CAN de même destination	50
3.5.1.3	Une trame pour N trames CAN sans contrainte de destination	53
3.5.1.4	Une trame pour N trames CAN de même destination avec attente bornée	54
3.5.1.5	Une trame pour N trames CAN sans contrainte de destination avec attente bornée	56
3.5.2	La passerelle de sortie	57
3.5.2.1	Pas de régulation des trames CAN par la passerelle de sortie	57
3.5.2.2	Régulation des trames CAN par la passerelle de sortie	57
3.6	Conclusion	59
4	Interconnexion par un réseau sans-fil	61
4.1	Introduction	61
4.2	Illustration de l'impact de Wi-Fi sur les stratégies de passerelle	61

4.2.1	Stratégies de passerelle	62
4.2.1.1	Stratégie de passerelle basique (un pour un)	63
4.2.1.2	Stratégies de passerelle groupées	68
4.2.1.3	Stratégies de passerelle Temporisées	70
4.3	Une architecture réseau faiblement chargée	74
4.3.1	Analyse de performance des stratégies de passerelle	76
4.4	Une architecture réseau plus chargée	78
4.4.1	Analyse de performance des stratégies de passerelle	80
4.5	Conclusion	83
5	Interconnexion par un réseau Ethernet commuté	85
5.1	Introduction	85
5.2	Vue d'ensemble de l'architecture réseau	85
5.3	Stratégies de passerelles d'entrées Ethernet	88
5.3.1	Stratégie de passerelle basique	88
5.3.2	Stratégies de passerelle groupées	89
5.3.2.1	Stratégie de passerelle deux pour un	89
5.3.2.2	Stratégie de passerelle trois pour un	90
5.3.3	Stratégies de passerelle temporisées	92
5.3.3.1	Stratégie de passerelle deux pour un; Temporisation de 0.5ms	92
5.3.4	Stratégie de passerelle trois pour un; temporisateur de 1ms	94
5.4	Scenarii de simulation et résultats	95
5.5	Stratégies de passerelle de sortie	102
5.5.1	Une Architecture réseau CAN/Ethernet commuté	102
5.5.2	Impact des stratégies de passerelle de sortie	104
5.5.2.1	Transmission immédiate VS régulation du trafic sur un scénario sélectionné	105
5.5.2.2	Transmission immédiate VS régulation du trafic sur des scénarios aléatoires	106
5.6	Conclusion	109
6	Conclusion et Perspectives	111
6.1	Conclusion	111
6.2	Perspectives	113
	Bibliographie	115

Table des figures

2.1	Passage du modèle point à point vers les bus spécifiques	6
2.2	Accès au médium CAN (Arbitrage CSMA/CR)	10
2.3	Trame CAN	11
2.4	Trame LIN	12
2.5	Cycle de communication FlexRay	13
2.6	Bus ARINC 429	14
2.7	Mot ARINC 429 (32 bits)	15
2.8	Trame Ethernet	16
2.9	Politique d'ordonnancement à priorité (Priority queuing policy)	18
2.10	Trame AFDX	19
2.11	Processus de régulation de trafic basé sur le crédit (Credit Based Shaper process)	23
2.12	Classification des réseaux sans fil	27
2.13	Mode infrastructure et Ad Hoc d'IEEE 802.11	28
2.14	Couche MAC IEEE802.11	31
2.15	Architecture réseau hybride automobile	37
3.1	Vue d'ensemble d'une architecture de réseau hybride	43
3.2	illustration du délai de bout en bout d'une trame	46
3.3	Rôles des passerelles	47
3.4	Illustration des stratégies d'encapsulation	48
3.5	Scénario avec une trame pour une trame CAN	49
3.6	Scénario avec une trame pour deux trames CAN même bus de destination	52
3.7	Scénario avec une trame pour deux trames CAN sans contrainte de destination .	53
3.8	Scénario avec une trame pour deux trames CAN même bus de destination, attente bornée à 0.5 ms dans la passerelle	55
3.9	Scénario avec une trame pour deux trames CAN sans contrainte de destination, attente bornée à 0.5 ms dans la passerelle	56
3.10	Principe de la régulation par la passerelle de sortie	58
4.1	Aperçu d'une architecture réseau hétérogène CAN/IEEE 802.11	62

TABLE DES FIGURES

4.2	Transmission d'une trame sur WI-FI	63
4.3	Scénario avec une trame WI-FI pour une trame CAN	64
4.4	Scénario avec une trame Wi-Fi pour une trame CAN; illustration de l'algorithme du backoff	65
4.5	Scénario avec une trame Wi-Fi pour une trame CAN; illustration d'une collision	66
4.6	Scénario considérant une stratégie de passerelle deux pour un	68
4.7	Scénario avec trois trames WI-FI pour une trame CAN; illustration d'une stratégie de passerelle trois pour un	69
4.8	Scénario avec deux trames CAN pour une trame Wifi; Temporisation de 0,6ms .	71
4.9	Scénario avec trois trames CAN pour une trame WI-FI; Temporisation de 1ms .	72
4.10	Une architecture réseau faiblement chargée	75
4.11	Une architecture réseau fortement chargée	78
5.1	Architecture réseau CAN-Ethernet (AVB/PQSE)	86
5.2	Processus de transmission des trames CAN distantes	87
5.3	Scénario avec une trame CAN pour une trame Ethernet	88
5.4	Scénario avec deux trames CAN pour une trame Ethernet	90
5.5	Scénario avec trois trames CAN pour une trame Ethernet	91
5.6	Scénario avec deux trames CAN pour une trame Ethernet; Temporisation de 0.5ms	92
5.7	Scénario avec trois trame CAN pour une trame Ethernet; Temporisation de 1ms	94
5.8	Délais d'encapsulation des trames	97
5.9	Délais des flux CAN sur Ethernet PQSE	98
5.10	Délais de bout en bout des flux CAN sur Ethernet PQSE	99
5.11	Délais des flux CAN sur AVB	100
5.12	Délais de bout en bout des flux CAN sur AVB	101
5.13	Une architecture réseau hybride simple	103
5.14	Transmission immédiate VS régulation du trafic	105

Liste des tableaux

2.1	Récapitulatif des normes IEEE802.11	29
2.2	Caractéristiques Bluetooth	33
3.1	Délais de bout en bout des flux (ms)	51
4.1	Configuration des flux CAN locaux	75
4.2	Configuration des flux CAN distants	76
4.3	Configuration des flux IEEE 802.11 locaux	76
4.4	Stratégies simulées	76
4.5	Charge des flux CAN distants	77
4.6	Collisions sans fil	77
4.7	Délais moyens des flux sans fil locaux	78
4.8	Flux CAN distants	79
4.9	Flux CAN locaux	80
4.10	Stratégies simulées	80
4.11	Nombre relatif de trames Wi-Fi générées par les flux CAN distants	81
4.12	Pourcentage des collisions sur le réseau sans-fil	81
4.13	Délais moyens des flux Wi-Fi locaux	81
4.14	Échéances dépassées des flux CAN distants	82
5.1	Distribution des flux CAN	96
5.2	Distribution des flux Ethernet	97
5.3	Configuration réseau	104
5.4	Maximum et moyenne des délais de bout en bout	107

LISTE DES TABLEAUX

Liste des acronymes

ACL Asynchronous Connection-Less.

AEEC Airlines Electronic Engineering Committee.

AFDX Avionic Full Duplex switched Ethernet.

AGC Apollo Guidance Computer.

AP Access Point.

AVB Audio Video Bridging.

BAG Bandwidth Allocation Gap.

BE Best Effort.

BLE Bluetooth Low Energy.

BPRZ BiPolar Return-to-Zero.

BSA Basic Set Area.

BSS Basic Service Set.

CAN Controller Area Network.

CBS Credit Based Shaper.

CFP Contention Free Period.

CFPool Contention Free-Pool.

CM Compression Master.

COTS Component Off The Shelf.

CP Contention Period.

CRC Cyclic Redundancy Check.

CSMA Carrier Sense Multiple Access.

CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.

CSMA/CD Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection.

CSMA/CR Carrier Sense Multiple Access with Collision Resolution.

DCF Distributed coordination function.
DIFS Distributed Inter Frame Space.
DLC Data Length Code.
DS Distribution System.
DSSS Direct-Sequence Spread Spectrum.

ECU Electronic control unit.
EDCA Enhanced Distributed Channel Access.
EDR Enhance Data Rate.
EOF End Of Frame.
ESS Extended Service Set.

FFD Full Function Device.
FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum.
FQ Fair Queueing.
FTDMA Flexible Time Division Multiple Access.

GFSK Gaussian Frequency Shift Keying.
GPS Generalized Processor Sharing policy.

HCCA HCF Controlled Channel Access.
HR-DSSS High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum.

IBSS Independent BSS.
IS-IS Intermediate System to Intermediate System.
ISM Industrial, Scientific and medical radio bands.

LIN Local Interconnect Network.
LLC Logical Link Control.
LR-WPAN Low-Rate Wireless Personal Area Network.

MAC Medium Access Control.

NRZ Non Return Zero.

OFDM Orthogonal frequency-division multiplexing.

PCF Point coordination function.

RC Rate Constrained.
RFD Reduce Function Device.
RTR Remote Transmission Request.

SC Synchronization Client.
SCO Synchronous Connection-Oriented.
SIFS Short Inter Frame Space.
SM Synchronization Master.
SOF start of frame.
SPB Shortest Path Bridging.
SPQ Strict Priority Queueing.
SRP Stream Reservation Protocol.

TDMA Time Division Multiple Access.
TSN Time Sensitive Networking.
TT Time-Triggered.
.
TTEthernet Time Triggered Ethernet.

VL Virtual Link.

WFQ Weighted Fair Queueing.
WLAN Wireless Local Area Network.
WPAN Wireless Personal Area Network.

1 Introduction

Contexte et motivation

Le 21^{ème} siècle étant l'ère de l'avènement des sciences et des nouvelles technologies pour l'amélioration de notre sécurité et la facilitation de la vie quotidienne, nous nous reposons de plus en plus sur des technologies qui sont de plus en plus complexes et qui utilisent le plus souvent des connexions internet. L'usage de ces technologies conduit à la mise en œuvre de systèmes embarqués tels que les terminaux de cartes à puce bancaires, les téléviseurs, les ordinateurs portables, ou les téléphones mobiles [1].

Par ailleurs, ces technologies de systèmes embarqués ont été déclinées dans différents domaines d'application. Dans le domaine médical plusieurs systèmes robotisés ont été mis en œuvre (par exemple le robot ROSA [2] proposé par la société Medtech utilisé pour effectuer des actes chirurgicaux sur le système nerveux humain). Dans le domaine de l'industrie automobile ou aéronautique/spatiale, les systèmes ABS ont été introduits en 1966 [3], suivis par le remplacement, par la société BOSCH, de l'injection mécanique par l'injection électronique [4] dans le but d'améliorer le rendement moteur, grâce à l'utilisation d'un calculateur électronique en 1967. De même, l'Apollo Guidance Computer (AGC) [5] développé en 1967, a été le premier système embarqué moderne développé pour l'industrie spatiale.

Le but recherché lors de la mise en œuvre de tels systèmes embarqués est non seulement l'obtention de bonnes performances en terme de temps de calcul ou en terme de temps de réponse, mais également la garantie du respect de contraintes temporelles et de sûreté de fonctionnement. En effet, en fonction des domaines applicatifs, l'occurrence d'erreurs peut être potentiellement catastrophique : par exemple, la perte de contact avec la sonde Pathfinder sur la planète mars en 1997. De même il est aisé d'imaginer l'impact d'une défaillance d'un système embarqué dans une usine chimique ou dans une centrale nucléaire.

De plus les systèmes embarqués les plus récents doivent faire face à une augmentation importante du nombre de capteurs et de calculateurs. La gestion des communications dans ces systèmes devient ainsi de plus en plus complexe à mettre en œuvre dans un environnement

1. INTRODUCTION

où les contraintes temporelles et physiques sont très fortes. Le taux d'échange de messages en augmentation permanente implique que les moyens de communication fournis doivent permettre d'acheminer les messages tout en respectant les contraintes de sûreté de fonctionnement imposées.

Cette problématique d'efficacité et de sûreté a amené les industriels des domaines automobile et avionique à développer des réseaux spécifiques de leurs domaines d'application tels que les réseaux [Controler Area Network \(CAN\)](#) [6] et [Local Interconnect Network \(LIN\)](#) [7]. Ces réseaux conviennent à leur contexte d'utilisation, mais présentent de relativement faibles débits de communication. En rapport avec l'augmentation rapide du taux de messages échangés, un besoin croissant en bande passante s'est fait ressentir. Pour pallier à ce besoin, la réponse choisie a été de recourir à des composants sur étagère ([Component Off The Shelf \(COTS\)](#)). Or les réseaux construits à partir de composants sur étagère ne sont pas a priori prévus pour la prise en compte de contraintes temps réel. Les industriels ont dû alors adapter ces réseaux en leur procurant la capacité à respecter les contraintes temporelles imposées par les systèmes embarqués temps réel. De cette adaptation naquirent les réseaux de types Ethernet temps réel qui ont apporté un gain non-négligeable en bande passante et câblage.

L'introduction de ce type de réseaux dans le domaine avionique et automobile s'est donc faite progressivement de telle sorte que l'impact sur les standards préexistants et les systèmes connectés soit minimal. Ainsi, l'utilisation d'Ethernet temps réel s'est faite en le considérant comme réseau fédérateur, interconnectant différents types de réseaux spécifiques reliant les capteurs/actionneurs ([CAN](#), [LIN](#), ...), cela implique l'utilisation de passerelles pour permettre la communication. Dès lors, le défi majeur à relever est de respecter les contraintes temporelles des applications utilisant ces réseaux hétérogènes (obtenus par interconnexion des réseaux de capteurs et du réseau fédérateur). En effet, ces contraintes peuvent être mises à mal au niveau des points d'interconnexion des différents réseaux.

Les principales approches utilisées pour le passage d'un réseau à un autre sont celles d'un pont par traduction, dans le cas où une transmission est effectuée entre deux réseaux de types différents, ou alors celles de ponts par encapsulation dans le cas où la transmission est effectuée entre deux réseaux d'extrémité de même type reliés par un réseau fédérateur. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte au niveau des passerelles (ponts par encapsulation) tels que l'algorithme d'encapsulation utilisé, le nombre de trames à encapsuler, les ordonnancements utilisés, le coût en bande passante ainsi que l'impact sur les distributions de délais (gigue). Une évaluation des performances de tels réseaux hétérogènes est donc nécessaire. L'objet de nos travaux porte alors sur l'étude de faisabilité, la proposition et la comparaison de techniques permettant l'interconnexion de réseaux hétérogènes temps réels pour des applications à contraintes temporelles fortes ou contraintes temporelles souples.

Contributions

Dans cette thèse, notre objectif est donc de proposer et évaluer différentes stratégies de passerelles par encapsulation qui peuvent être adaptées aux différents réseaux fédérateurs choisis. Dans un premier temps, nous prenons en compte uniquement une stratégie de passerelle qui ne permet d'encapsuler qu'une seule trame des bus spécifiques dans une trame du réseau fédérateur choisi. Par la suite, nous faisons évoluer cette stratégie afin que plusieurs trames d'un bus spécifique distant puissent être encapsulées dans une seule trame du réseau fédérateur. Cette évolution permet d'améliorer l'utilisation de la bande passante en diminuant le nombre de trames transmises sur le réseau fédérateur. Nous introduisons un temporisateur à cette stratégie afin de borner le délai introduit par l'attente de trames sur la passerelle. La transmission de plusieurs trames en rafale sur un bus spécifique distant peut potentiellement créer un engorgement de trafic; ce qui par conséquent, augmente les délais des trames et provoque ainsi une violation des contraintes temporelles. Pour pallier cette problématique, nous avons introduit un mécanisme de régulation de trafic à faible coût qui permet de sauvegarder la périodicité des trames afin de résorber les potentiels engorgements et de ce fait réduire le délai maximum des trames sur le bus spécifique distant.

Nous présentons dans le chapitre 2 l'évolution des réseaux embarqués, et décrivons les différentes technologies réseau dédiées au domaine automobile (CAN, LIN et FlexRay[8]) et au domaine avionique (ARINC 429 [9] , ARINC 629 [10] et [Avionic Full Duplex switched Ethernet \(AFDX\)](#) [11]). Nous rappelons également différentes solutions Ethernet orientées temps-réel (Ethernet commuté, [Audio Video Bridging \(AVB\)](#) [12] et [Time Triggered Ethernet \(TTEthernet\)](#) [13]) et sans fil (Wi-Fi [14], Bluetooth [15] et ZigBee [16]).

Dans le chapitre 3 nous présentons l'architecture de réseaux hétérogènes composée de bus spécifiques CAN distants interconnectés via des passerelles par encapsulation à un réseau fédérateur qui peut être un réseau Ethernet classique , un réseau Ethernet commuté ou un réseau sans fil de type WIFI. Nous décrivons plus particulièrement les différentes stratégies de passerelle que nous avons introduites:

- Une stratégie d'encapsulation basique, où une trame CAN est encapsulée dans une trame du réseau fédérateur
- Une stratégie dite groupée, où n trames CAN sont encapsulées dans une trame du réseau fédérateur.
- Une stratégie dite temporisée, où les trames CAN sont encapsulées dans une trame du réseau fédérateur tant que n n'est pas atteint ou tant que la valeur du temporisateur n'est pas atteinte.

Dans les chapitres 4 et 5 nous analysons par simulation l'impact des différentes stratégies de passerelles, sur deux types d'architectures de réseaux hétérogènes utilisant deux réseaux fédéra-

1. INTRODUCTION

teurs différents.

- Une architecture réseau hétérogène interconnectant des bus CAN distants via un réseau Wi-Fi (IEEE 802.11g). Cette architecture réseau est flexible et permet la transmission de flux réseau ayant des contraintes temporelles souples.
- Une architecture réseau hétérogène interconnectant des bus CAN distants via un réseau Ethernet commuté (le réseau Ethernet pouvant être un Ethernet commuté SPQ ou un réseau Ethernet AVB). Cette architecture permet d'obtenir des communications temps réel à contraintes fortes où il est essentiel de s'assurer que le réseau dans sa globalité garantit les délais de bout en bout des flux.

Nous concluons ce travail dans le chapitre 6 et proposons quelques perspectives.

2 Évolution des technologies de réseaux embarquées

2.1 Les débuts de l'électronique embarquée

Depuis la fin des années 80, l'électronique embarquée prend de plus en plus de place dans les industries automobiles et aéronautiques [17]. Son introduction a permis de proposer de nouvelles fonctionnalités afin d'améliorer l'efficacité des différents systèmes i.e : l'arrivée des systèmes d'injection électronique dans l'industrie automobile pour l'amélioration du rendement des moteurs et la diminution de la consommation de carburant. D'autre part, l'électronique embarquée a permis également l'amélioration de la sécurité, i.e : l'arrivée du pilotage automatique dans l'aéronautique et les systèmes ABS, ESP dans l'automobile.

Au début de leurs développements, les systèmes embarqués étaient des systèmes centralisés se contentant de lire les données fournies par les capteurs et de transmettre les ordres aux actionneurs. La centralisation du système créant un point de panne unique, le passage vers un modèle plus distribué s'est alors fait graduellement. L'électronique embarquée a consisté par la suite en un ensemble de calculateurs distribués dédiés chacun à une fonction bien spécifique, interconnectés par des liens point à point.

L'augmentation du nombre de fonctions dans les systèmes embarqués augmente, de ce fait, le nombre de calculateurs [Electronic control unit \(ECU\)](#). Cette augmentation ainsi que l'augmentation du nombre de capteurs ont impliqué une hausse du nombre de connexions point à point, ce qui complexifie le système et induit une augmentation du poids.

Une évolution de ce modèle étant nécessaire, les solutions adoptées ont été d'attribuer la gestion d'un ensemble de fonctions à chaque calculateur et de réduire le nombre de connexions. D'autre part, l'adoption du multiplexage du canal de communication a permis de simplifier le câblage. L'application de ces solutions s'est faite par l'introduction des technologies spécifiques de type bus (e.g. [CAN](#) pour l'automobile) afin d'interconnecter les calculateurs distribués. Ces technologies ont été conçues pour respecter l'ensemble des contraintes liées aux systèmes embarqués : latence de communication et gigue bornées (variation de la latence au fil du temps), tolérance aux

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

pannes, etc. Ces technologies s'appuient donc sur des méthodes d'accès déterministes (e.g. [Carrier Sense Multiple Access with Collision Resolution \(CSMA/CR\)](#) pour CAN) qui permettent des garanties sur les délais de communication. La figure 2.1 illustre le passage du modèle de connexion point à point vers les bus spécifiques.

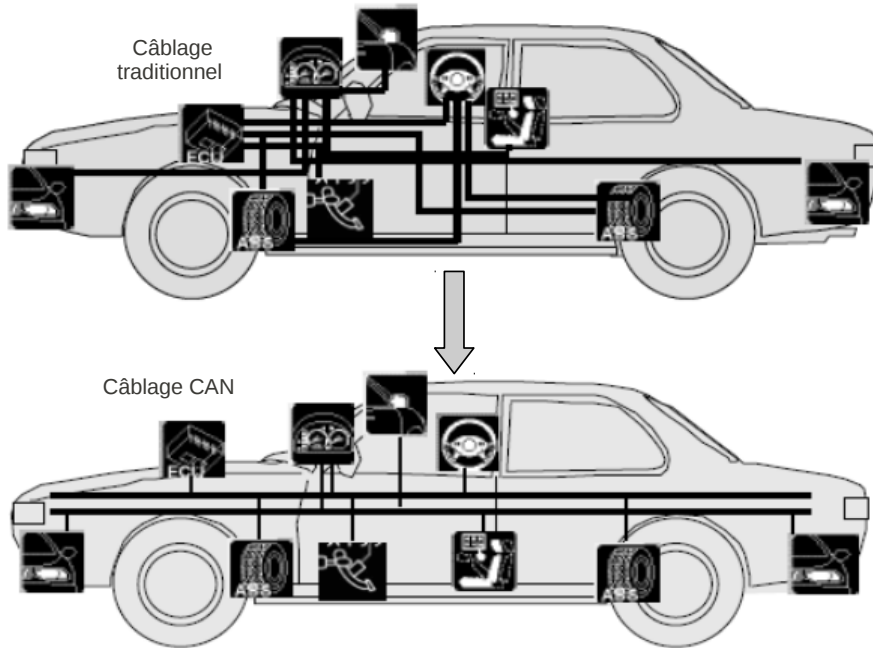


FIGURE 2.1 – Passage du modèle point à point vers les bus spécifiques

Toutefois, ces technologies offrent des débits limités qui ne leur permettent pas d'absorber le volume croissant des communications entre les différentes fonctions d'un système embarqué. En outre, ces technologies présentent souvent des limitations pour le passage à l'échelle, en terme de longueur de câbles et/ou de nombre de stations connectées.

Les différentes limitations des bus spécifiques ont poussé au développement de différentes technologies offrant une bande passante bien supérieure et/ou passant efficacement à l'échelle. La plus part de ces solutions sont fondées sur des extensions temps réel d'Ethernet ([TTEthernet](#), [AFDX](#), ...). Ces différentes extensions permettent de garantir des bornes supérieures sur le délai de transmission d'une donnée. Néanmoins, ces technologies introduisent un surcoût liée au protocole de communication, qui s'avère être très important lors de la transmission de données de petite taille. Ces technologies sont donc peu adaptées à l'interconnexion de capteurs et d'actionneurs.

L'utilisation de ces technologies réseau comme réseau fédérateur pour l'interconnexion d'un en-

semble de bus spécifiques représente un bon compromis permettant de s'appuyer sur des solutions déjà déployées autour des bus. On obtient alors une architecture de communication à deux niveaux; les capteurs et les actionneurs sont interconnectés par des bus spécifiques *localement*, les données sont échangées entre ces bus via le réseau fédérateur *globalement*.

Dans ce chapitre, nous décrivons brièvement différentes technologies embarquées. Dans un premier temps, nous présentons différents bus spécifiques à leur domaine d'application (telles que [CAN](#), [LIN](#),...) et, dans un second temps, nous présentons différents protocoles basés sur Ethernet tels que [AFDX](#), [AVB](#) ou [TTEthernet](#). De plus, nous présentons brièvement différentes technologies sans fil. Nous concluons ce chapitre par un historique sur les architectures hétérogènes embarquées et les motivations poussant à la conception de ces dernières.

2.2 Les bus et réseaux partagés spécifiques

Les réseaux embarqués ne sont pas uniquement conçus dans le but de limiter le nombre de liens et de diminuer le poids du câblage mais ils doivent aussi garantir des contraintes temporelles. Les délais de communication point à point doivent être bornés. Les transferts de données sont essentiellement périodiques, avec des périodes courtes et des gigue faibles. Les messages transférés sur ce type de réseau sont généralement courts. Dans les paragraphes suivants, nous présentons une brève synthèse des principaux protocoles de communication spécifiques utilisés dans deux contextes applicatifs embarqués importants: l'automobile et l'aéronautique.

2.2.1 Principales technologies automobiles

Les véhicules modernes embarquent plus de soixante-dix (70) calculateurs nommés [ECU](#) [18]. Ces composants sont interconnectés via des bus spécifiquement développés pour le domaine automobile. Le principal bus utilisé dans ce domaine est le bus [CAN](#); d'autres bus ont été développés, nous citons parmi eux le bus [LIN](#) et FlexRay que nous décrivons brièvement.

2.2.1.1 Controller Area Network (CAN)

Le bus [CAN](#) est un bus série principalement développé pour l'industrie automobile mais qui a été réutilisé par la suite dans les industries aéronautiques et spatiales. Il a été développé par BOSCH dans le but de diminuer le nombre de liens point à point afin de diminuer le câblage ainsi que le poids. Le protocole [CAN](#), standardisé dans les années 1990 est un protocole de communication série utilisé dans les systèmes temps réel nécessitant un haut niveau d'intégrité. Le standard décrit principalement les couches physique et liaison de données.

La couche physique est chargée de transmettre les signaux électriques sur le bus. Le codage en bande de base utilisé est le codage [Non Return Zero \(NRZ\)](#) [19]. Deux sous-couches composent la

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

couche liaison de données; la sous-couche **Logical Link Control (LLC)** et la sous-couche **Medium Access Control (MAC)**. La sous-couche **LLC** s'occupe du filtrage des messages, de la notification de surcharge ainsi que du recouvrement des erreurs. La sous-couche **MAC** se charge de l'encapsulation et la dés-encapsulation des données, du codage de trames, de la détection d'erreurs, de la signalisation d'erreurs, de l'acquittement des messages et de la sérialisation/dé-sérialisation des données.

Ces couches sont brièvement décrites dans les paragraphes suivants.

La couche physique définit la représentation des bits, l'encodage de ces derniers, la synchronisation, le débit binaire ainsi que la longueur du bus. Elle traduit les données fournies par la couche liaison de données en signal électrique. Au niveau du récepteur, la couche physique traduit les signaux électriques en un format donné et le transmet à la couche liaison de données. Plusieurs couches physiques ont été définies pour des transmissions à bas et à haut débit.

- La norme ISO 11898-3 pour un bus **CAN** low speed, où les transmissions s'effectuent entre 0 kbits/s et 125 Kbits/s.
- La norme ISO 11898-2 pour un bus **CAN** high speed où les transmissions sont effectuées à des débits entre 125 Kbits/s et 1 Mbits/s.

Le nombre d'équipements connectés au bus varie en fonction de la norme utilisée : pour la norme ISO 11898-3 le nombre est limité à 20, pour la norme ISO 11898-2 le nombre d'équipements peut aller jusqu'à 30. Les bits transmis sur le bus **CAN** sont représentés par deux états : un état récessif et un état dominant. L'état récessif est représenté par le 1 logique ainsi qu'une faible tension, l'état dominant est représenté par le 0 logique associée à une tension élevée. Si tous les nœuds connectés au réseau transmettent un bit récessif durant un même temps bit, un bit récessif apparaît sur le bus **CAN**. Sachant que les bits dominants écrasent toujours les bits récessifs, si un bit dominant est émis pendant le même temps bit, tout le bus passe à l'état dominant. Ce processus est important pour l'arbitrage d'accès au bus.

Le protocole **CAN** spécifie un encodage **NRZ**. **NRZ** spécifie que le niveau logique d'un bit ne change pas pendant un temps bit. Le signal reste constant autant de temps que nécessaire. L'inconvénient de **NRZ** est qu'il n'y a pas de moyen de distinguer le début et la fin des bits lors de l'émission de deux ou plusieurs bits dominants ou récessifs successivement. Ainsi, si un grand nombre de bits identiques sont émis successivement sur le bus, une technique de bit stuffing doit être utilisée. Le bit stuffing spécifie qu'un bit de polarité inverse doit être ajouté après toute séquence de cinq bits consécutifs de même polarité.

La couche liaison de données (LLD) représente le noyau du protocole **CAN**, elle est responsable de l'encapsulation/dés-encapsulation des données, le codage de trames (bits stuffing), la détection/signalisation d'erreurs, l'acquittement des messages ainsi que la sérialisa-

tion/désérialisation. Deux standards de la couche liaison de données ont été définis. Dans ce document nous traiterons du standard CAN 2.0A où l'identification d'une trame se fait sur 11 bits.

CAN est un protocole de transmission par message. Chaque transmission peut transporter jusqu'à 8 octets de données. Le protocole utilise CSMA/CR pour l'arbitrage d'accès au médium. Le protocole est orienté message; chaque message a une priorité spécifique avec laquelle il gagne l'accès au bus dans le cas de transmissions concurrentes. La transmission des trames est non préemptive (transmission non interrompue). Quand le bus est à l'état libre (récessif), tous les nœuds peuvent accéder au bus. Si des accès concurrents au bus sont détectés, la priorité est accordée en utilisant une méthode d'arbitrage bit à bit non destructif. Le message ayant la priorité la plus élevée continue sa transmission sans interruption. Les transmissions des nœuds ayant des messages de moindre priorité sont arrêtées.

L'arbitrage d'accès au bus est effectué durant la transmission du champ identifiant. Chaque message CAN possède un identifiant de 11 bits. Cet identifiant est l'élément principal de l'arbitrage CAN. L'identifiant n'identifie pas uniquement le message, mais définit aussi sa priorité. Pendant l'arbitrage, chaque nœud émettant sur le bus écoute en même temps ce dernier tout en comparant les bits reçus avec les bits envoyés. Si un bit dominant est reçu pendant qu'un nœud émet un bit récessif, le nœud perd l'arbitrage et arrête sa transmission; le nœud devient alors destinataire du message en cours de transmission. À la fin de la transmission du champ d'arbitrage, tous les nœuds ayant perdu l'arbitrage arrêtent leurs transmissions, et le message le plus prioritaire est transmis.

Dès que le bus est de nouveau libre, les contrôleurs CAN effectuent automatiquement une nouvelle tentative de transmission de leurs messages. Un autre cycle d'arbitrage est effectué et le message avec la plus haute priorité est transmis, les messages les moins prioritaires doivent attendre un nouveau cycle. Un identifiant de message doit être spécifique à une donnée. L'identifiant doit être utilisé uniquement par un seul nœud connecté au bus. Ce mécanisme assure que deux messages avec le même identifiant ne peuvent être en concurrence pour l'accès au bus. La figure 2.2 illustre le processus d'arbitrage du protocole CAN. Dans l'exemple, les nœuds A, B et C commencent leur transmission en même temps, ils transmettent les mêmes bits jusqu'au bit 3 de l'identifiant. Durant la transmission du 3ème bit, le nœud A transmet un bit récessif, alors que les nœuds B et C transmettent un bit dominant; le bit récessif est écrasé par le bit dominant. À cet instant, le nœud A perd l'arbitrage et passe en mode de réception car un nœud ayant perdu l'arbitrage peut potentiellement être le destinataire du message. Les nœuds B et C continuent leur transmission jusqu'au septième bit où le nœud C transmet un bit récessif alors que le nœud B transmet un bit dominant. Le nœud C arrête sa transmission et passe en mode réception, le nœud B gagne l'accès au médium et continue sa transmission.

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

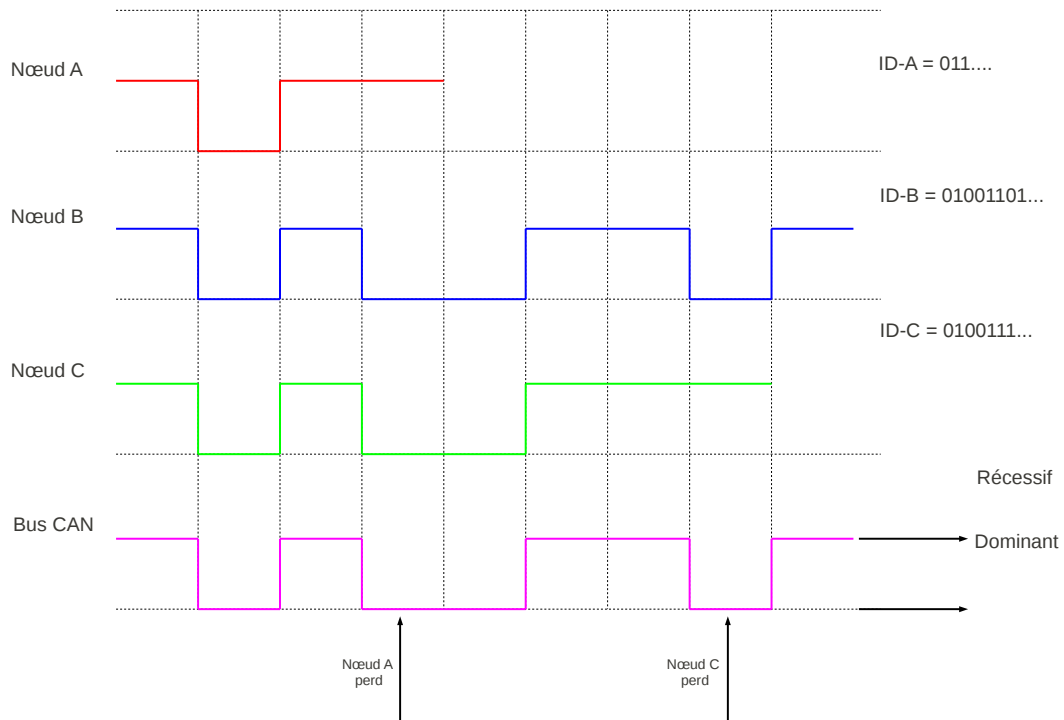


FIGURE 2.2 – Accès au médium CAN (Arbitrage CSMA/CR)

Dans le paragraphe suivant, nous détaillons brièvement les trames de données **CAN**. Ces trames sont utilisées pour l'envoi des données sur le réseau. Une trame de données peut contenir jusqu'à huit octets de données.

Comme dit précédemment, le protocole **CAN** spécifie deux versions pour les trames de données: le format de base et un format étendu. La spécification **CAN 2.0A** que nous utilisons définit le format de base où la trame possède un identifiant ayant une taille de 11 bits, alors que la spécification **CAN 2.0B** définit le format étendu de la trame où l'identifiant est défini avec une taille de 29 bits. Ce format est utilisé dans les systèmes complexes avec une lourde charge réseau, où le nombre de messages créés par les émetteurs est plus important que le nombre d'identifiants que le protocole **CAN** peut assigner. La trame de données **CAN** est composée de sept champs différents comme le montre la figure 2.3.

- **Le champs *start of frame (SOF)*:** sa taille est de 1 bit à l'état dominant. Le bus **CAN** est à l'état récessif avant la transmission de ce bit.
- **Le champ d'arbitrage:** sa taille est de 12 bits, 11 bits pour l'identifiant de message,

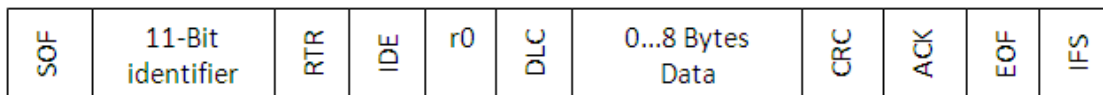


FIGURE 2.3 – Trame CAN

suivi d'un bit **Remote Transmission Request (RTR)**. Plus l'identifiant de message est petit plus la priorité du message est élevée. Un message ayant tous les bits de l'identifiant mis à zéro aura la priorité la plus élevée par rapport aux autres messages du réseau. Le bit **RTR** indique le type de trame (trame de données ou une trame de requête). Un bit **RTR** à l'état dominant définit une trame de données.

- **Le champ de contrôle:** sa taille est de 6 bits. Le bit de poids fort de ce champ est utilisé pour différencier la norme **CAN** utilisée (**CAN 2.0A** et **CAN 2.0B**). Sur les 5 bits suivants, le premier n'est pas utilisé et les quatre autres servent à fournir le nombre d'octets de données du champ de données. Ces quatre bits sont nommés **Data Length Code (DLC)**.
- **Le champ de données (maximum de 64 bits):** la taille de ce champ varie entre 0 et 8 octets. Si la taille de ce champ est de 0 alors la trame est une trame de requête.
- **Le champ Cyclic Redundancy Check (CRC):** la taille de ce champ est de 16 bits. Les 15 premiers bits pour le **CRC**. Le dernier bit représente un délimiteur, ayant une valeur toujours récessive. Ce champ permet de détecter les erreurs de transmission.
- **Le champ ACK:** la taille de ce champ est de 2 bits; un bit pour l'acquiescement ainsi qu'un bit délimiteur d'acquiescement qui est toujours récessif. Ce champ permet à l'émetteur de savoir que les nœuds ont reçu le message.
- **Le champ End Of Frame (EOF):** Il marque la fin d'une trame **CAN**. Sa taille est de 7 bits consécutifs à l'état récessif.

2.2.1.2 Local Interconnect Network (LIN)

L'utilisation des bus **CAN**, ayant un coût prohibitif pour les applications nécessitant des performances plus limitées dans l'automobile (tel que les vitres ou les sièges électriques), a donné naissance au besoin de développer un protocole de communication à faible coût. La mise en production du protocole **LIN** a permis de répondre à ce problème en offrant des communications permettant de connecter un ensemble de nœuds réseau à faible coût multiplexé. Ce protocole propose des communications Maître/Esclave. Il est utilisé lorsque la bande passante du protocole **CAN** n'est pas nécessaire. Actuellement, le protocole **LIN** est utilisé en association du protocole

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

CAN pour les communications à faible coût.

La trame LIN contient cinq champs représentés par deux parties distincts, une partie en-tête et une partie réponse, la figure 2.4 présente cette trame.

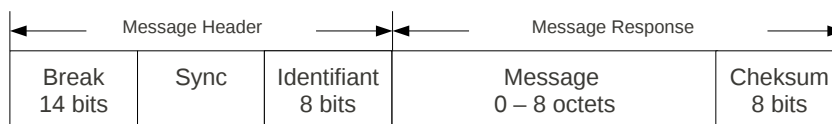


FIGURE 2.4 – Trame LIN

La partie entête de la trame est composée de :

- Un champ break, de 14 bits qui correspond à un champ de début de trame pour tous les nœuds réseau. Les 13 premiers bits de ce champ sont de poids fort; le dernier bit, nommé délimiteur break, est quant à lui de poids faible.
- Un champ sync, utilisé par les nœuds esclave pour ajuster leur vitesse automatiquement à celle du bus, ce qui permet leur synchronisation avec le bus.
- Un champ ID, d'une taille de 8 bits, dont 6 correspondent à l'identifiant d'un message, et 2 bits de parité. L'identifiant spécifie un message et non pas un nœud du réseau.

La partie réponse de la trame est divisée en deux champs :

- Un champ de données, ce champ contient au maximum 8 octets de données. Il est transmis par un nœud esclave.
- Un champ checksum, d'une taille de 8 bits. Il est transmis par un nœud esclave.

Un seul nœud maître est considéré sur le bus. Ce nœud joue un double rôle Maître/Esclave. Les autres nœuds du bus sont considérés comme étant des nœuds esclaves. Les communications sur le bus LIN sont contrôlées uniquement par le maître.

L'en-tête de la trame est toujours transmise par le maître. La réponse, quant à elle, est transmise par les nœuds esclaves. Chacun des nœuds esclaves du bus s'abonne ou transmet des données suivant les identifiants de données.

Selon l'entête reçue, un nœud esclave décide de l'action à effectuer :

- Envoyer les données ainsi que le checksum si l'identifiant reçu correspond à l'identifiant des données en sa possession.
- Lire les données sur le bus si l'identifiant de données correspond à l'identifiant des données auquel le nœud est abonné.
- Ignorer le message et attendre le prochain champ break transmis dans les autres cas.

2.2.1.3 FlexRay

FlexRay est un bus de communication multi-maître synchronisé. Il a été développé par un consortium regroupant plusieurs constructeurs automobiles ainsi que leurs équipementiers. Les principaux membres de ce consortium sont BMW, Bosch, Daimler, General Motors, Freescale Semiconductor et Volkswagen.

FlexRay a été standardisé sous la norme ISO 10681-1 en 2010. Il a été développé pour les besoins spécifiques automobiles. Le protocole FlexRay a été conçu afin de répondre aux besoins de bande passante, de déterminisme et de synchronisation des systèmes véhiculaires (X-by-wire) dans un environnement à contraintes fortes. Il a été développé dans une optique de réutilisation de code (le code existant développé pour le protocole CAN peut être réutilisé). Il est déployé dès 2006 pour les véhicules de la marque BMW.

Le protocole FlexRay permet d'atteindre un débit maximum de 10Mb/s avec une trame de données pouvant atteindre jusqu'à 254 octets en employant deux canaux de communications. Il combine les approches statique et dynamique pour la transmission des messages en incorporant les avantages des protocoles synchrone et asynchrone. Il offre des mécanismes de tolérance aux fautes et permet de transmettre des flux périodiques et apériodiques, ceci afin que le protocole puisse répondre aux demandes des systèmes déterministes. Un réseau FlexRay est composé d'un ensemble de clusters qui sont composés d'un ensemble d'ECU interconnectés via les deux canaux. Chaque canal correspond à un bus, mais il est possible d'obtenir des topologies en étoile en utilisant des hubs.

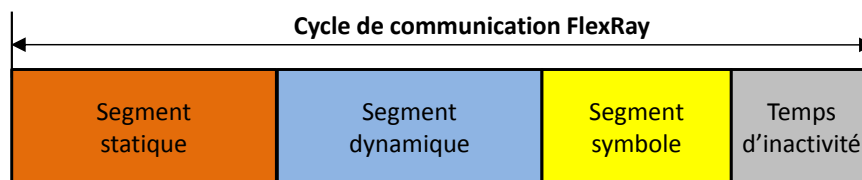


FIGURE 2.5 – Cycle de communication FlexRay

Le protocole FlexRay permet d'obtenir des communications guidées, à la fois par le temps et par les événements. Au niveau MAC, le protocole définit un cycle de communication périodique composé de quatre segments ; un segment statique, un segment dynamique, un segment symbole et un temps d'inactivité réseau.

Le segment de communication statique utilise le protocole [MAC Time Division Multiple Access \(TDMA\)](#), chaque station FlexRay peut avoir plusieurs slots de communication de même taille dans une même fenêtre.

Le segment dynamique quant à lui utilise le protocole [Flexible Time Division Multiple Access \(FTDMA\)](#) au niveau [MAC](#). Des slots de tailles variables sont alloués aux différentes stations.

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

Le slot est de durée minimale lorsqu'il n'est pas utilisé par la station. Dans le cas contraire, sa longueur dépend de la taille de la trame transmise.

La figure 2.5 présente un cycle de communication pour le protocole FlexRay.

La trame FlexRay est divisée en trois segments distincts

- Un segment entête, d'une taille de 5 octets, contient principalement l'identifiant de la trame et la taille de la charge utile.
- Un segment charge utile qui peut contenir jusqu'à 254 octets.
- Un segment CRC de 3 octets.

2.2.2 Principales technologies avions

Depuis l'apparition des systèmes x-by wire, les avions modernes embarquent de plus en plus de calculateurs, de capteurs et d'actionneurs. Ces composants sont interconnectés via des bus ou des réseaux. Dans cette section, nous décrivons les principaux bus développés spécifiquement pour les systèmes avioniques complexes; les bus ARINC 429 et les bus ARINC 629.

2.2.2.1 ARINC 429

ARINC 429 est parmi les bus les plus largement déployés dans l'aviation civile, le bus ARINC 429 est une technologie éprouvée ayant fait ses preuves. La norme a été développée par l'[Airlines Electronic Engineering Committee \(AEEC\)](#) publiée dès avril 1978 et découle directement des développements de la norme ARINC 419 [20].

La norme ARINC 429 est utilisée par les constructeurs Boeing et Airbus pour plusieurs de leurs modèles d'avions. Le bus ARINC 429 a été majoritairement déployé jusqu'à l'apparition des avions des gammes Boeing 787 et Airbus A380 et l'introduction d'[AFDX](#).

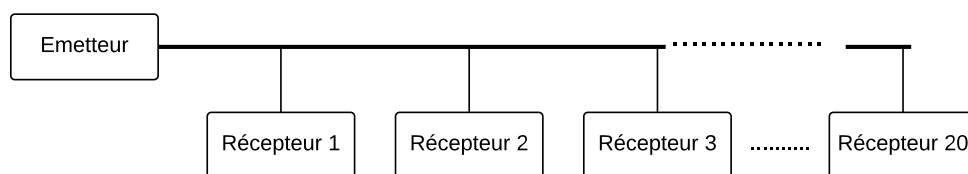


FIGURE 2.6 – Bus ARINC 429

La norme ARINC propose un bus de données série unidirectionnels. Cette topologie impose l'utilisation d'un seul nœud émetteur pour un maximum de 20 récepteurs sur le bus. La figure 2.6 fournit une représentation du bus ARINC 429. Les connexions entre les nœuds sont réalisées via une paire torsadée blindée et l'encodage des bits retenu est un encodage [BiPolar Return-to-Zero](#)

2.2. LES BUS ET RÉSEAUX PARTAGÉS SPÉCIFIQUES

(BPRZ). La couche liaison de données quant à elle utilise des mots d'une taille de 32 bits fixes pour coder les données. La figure 2.7 représente un mot ARINC 429.

P	SSM			Data																	SDI		SDI																																																																								
32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1																																																																
MSB																																32 Bit ARINC 429 Word																																LSB																															

FIGURE 2.7 – Mot ARINC 429 (32 bits)

- Le bit 32 est un bit de parité
- Les bits 31 et 30 contiennent la matrice 'sign/status'
- Les bits de 29 à 11 permettent le stockage des données
- Les bits 9 et 10 représentent les identifiants source/destination
- Les bits de 8 à 1 contiennent un label permettant d'identifier les données et les paramètres associés.

Les bus ARINC 429 sont largement déployés et acceptés dans l'aéronautique; Cependant leur nature mono-émettrice nécessite une grande quantité de câblage pour interconnecter un ensemble de systèmes avioniques. Le poids qu'ils introduisent ainsi que leurs faibles débits ont conduit au développement de technologies plus performantes

2.2.2.2 ARINC 629

Le concept mono-transmetteur/multi-receveur d'ARINC 429 ne pouvant faire face à l'augmentation du nombre applications communicantes, les industriels de l'aéronautique se sont alors mis à développer de nouveaux bus. Ainsi Boeing a développé, dès 1989, le bus ARINC 629 pour le Boeing 777.

Ce bus est multi-émetteur, contrairement au bus ARINC 429, chaque terminal ARINC 629 a la capacité d'envoyer des données vers n'importe quel autre terminal connecté au bus. L'intérêt premier de l'utilisation d'un bus multi émetteur tel qu'ARINC 629 est d'augmenter le taux d'échange de données tout en réduisant le câblage utilisé. De plus, ce type de bus est plus fiable et permet l'intégration de systèmes complexes. Avec un nombre de terminaux connectés allant jusqu'à 128, ARINC 629 a introduit une souplesse dans la conception et l'échange de données, cela même si un nombre trop élevé de terminaux peut constituer un obstacle à une implémentation réelle. Le bus ARINC 629 fournit un débit allant jusqu'à 2 Mbps avec un accès au bus supportant deux protocoles d'accès (protocole basique (BP) et protocole combiné (CP)). L'accès au bus est orienté [Carrier Sense Multiple Access \(CSMA\)](#), et combine les approches [CSMA](#) et [TDMA](#).

L'utilisation d'ARINC 629 a permis de réduire le nombre de connexions, donc le poids du câblage, tout en augmentant le débit du réseau en comparaison avec les bus avioniques classiques.

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

Ce protocole n'a cependant pas rencontré un franc succès, à cause notamment du prix de ses composants; ce qui a poussé l'industrie aéronautique à se pencher vers les composants sur étagères basés sur la technologie Ethernet commuté et au développement d'[AFDX](#).

2.3 Les réseaux Ethernet temps réel

Le nombre d'applications embarquées étant sans cesse en augmentation, le volume des communications est de plus en plus important. Les bus automobiles et avioniques dédiés ayant pour point commun un faible débit de communication (1Mbits/s pour le bus [CAN](#)), un besoin en bande passante plus large se fait ressentir. L'augmentation des débits de communication étant nécessaire, les principales solutions explorées sont fondées sur l'utilisation de réseaux basés sur Ethernet. Dans les paragraphes suivants nous décrivons les principales solutions embarquées basées sur Ethernet.

2.3.1 Ethernet Commuté

Ethernet [\[21\]](#) a tout d'abord été développé pour être utilisé dans les réseaux de bureau. Le standard Ethernet 802.3 est rapidement devenu la technologie réseau la plus répandue. L'adoption généralisée de celui-ci a conduit à une baisse des prix des composants et à une augmentation de la robustesse de ses déploiements. De plus, une tendance à étendre son domaine d'utilisation est née. En effet, l'utilisation d'Ethernet à la place d'un protocole de communication industrielle spécifique permet de faciliter le développement des applications.

La figure [2.8](#) représente le format d'une trame Ethernet.

Preamble (7 bytes)	SoF (1 byte)	Dst Address (6 bytes)	Src Address (6 bytes)	Type (2 bytes)	Data (46..1500 bytes)	FCS (4 byte)
-----------------------	-----------------	--------------------------	--------------------------	-------------------	--------------------------	-----------------

FIGURE 2.8 – Trame Ethernet

- Le champ SOF: d'une taille de 1 octet, ce champ indique le début de trame.
- Le champ dst adress: d'une taille de 6 octets, ce champ identifie la station destination des données.
- Le champ src adress: d'une taille de 6 octets, ce champ identifie la station émettrice des données.
- Le champ type : d'une taille de 2 octets, ce champ indique le type du protocole de transport.
- Le champ data : d'une taille variant entre 46 et 1500 octets, ce champ contient les données transmises.
- Le champ FCS : d'une taille de 4 octets, ce champ permet la détection d'erreurs.

Ethernet half duplex où une seule station transmet à la fois via un canal partagé est fondé sur une méthode d'accès au médium de type [Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection \(CSMA/CD\)](#) [22]. Cette méthode d'accès au médium vise à fournir un accès statistiquement équitable à tous les nœuds.

Avant la transmission d'une trame, une station doit attendre une période d'inactivité du médium. Si une collision est détectée pendant la transmission, les stations propagent cette dernière sur le réseau pendant un temps prédéfini (une trame de taille minimale). Avant de retransmettre leurs trames, les stations émettrices doivent attendre un temps aléatoire. Pour permettre la détection de collisions, les trames transmises doivent avoir une taille minimale de 64 octets, les trames courtes sont ainsi bourrées pour atteindre la longueur minimale. Il est à noter que [CSMA/CD](#) introduit un temps d'attente aléatoire avant les retransmissions, cela fait d'Ethernet un réseau non déterministe.

Ethernet half duplex compose un seul domaine de collision. L'introduction de commutateur (802.1D) a permis de connecter chaque nœud du réseau au commutateur et de ce fait mettre en place une topologie réseau en étoile qui permet de segmenter le domaine de collision aux connexions entre les stations et le commutateur (point à point). De plus, cette topologie permet de transmettre des données vers des nœuds différents simultanément. Par la suite, l'introduction de liens bidirectionnels Full Duplex a permis d'éliminer complètement les collisions.

Les commutateurs 802.1D implémentent une table de commutation permettant d'associer (dynamiquement par apprentissage) chaque adresse de destination avec un port de sortie. À la réception d'une trame, le commutateur vérifie sa validité. Si la trame est valide, elle est dirigée vers le(s) port(s) de sortie associé(s) à l'adresse de destination, sinon la trame est détruite.

Les commutateurs Ethernet permettent de spécifier jusqu'à huit niveaux de priorités associées à différentes applications (vidéo, audio, ...). De plus, différentes politiques de services peuvent être implémentées parmi elles nous citons [Strict Priority Queueing \(SPQ\)](#) [23]. Les commutateurs Ethernet [SPQ](#) associent un niveau de priorité à chaque flux. À la réception des trames au niveau du commutateur, elles sont classées selon leur priorité puis mises en attente dans la file associée à la priorité. Les trames sont ainsi transmises selon leur ordre de priorité. La figure 2.9 illustre ce processus.

Le principal inconvénient des commutateurs [SPQ](#) est que les files d'attente de faible priorité peuvent se retrouver dans l'impossibilité de transmettre leurs trames. Différentes politiques n'ayant pas ce problème ont été introduites, nous pouvons citer [Weighted Fair Queueing \(WFQ\)](#) [23]. [WFQ](#) est un algorithme d'ordonnancement de paquets basé sur une implémentation de [Generalized Processor Sharing policy \(GPS\)](#) et de [Fair Queueing \(FQ\)](#). Alors que [FQ](#) partage le débit des liens en portions égales, [WFQ](#) permet de spécifier pour chaque flux la fraction de bande passante attribuée. Le service offert à chaque file d'attente par [WFQ](#) est pondéré par l'association d'un poids w_i à chacun des N flux. Ainsi, le flux i atteint un débit minimal égal à $\frac{w_i}{(w_1 + w_2 + \dots + w_N)} R$, (R correspond au débit du lien).

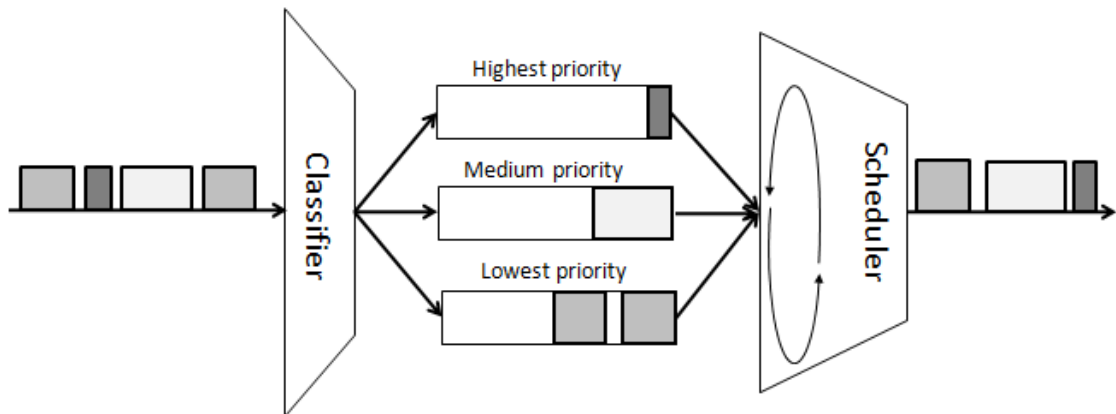


FIGURE 2.9 – Politique d’ordonnancement à priorité (Priority queuing policy)

2.3.2 ARINC 664 (AFDX)

Avionics Full-Duplex switched ethernet est décrit par le standard ARINC 664 partie 7. Il a été proposé par Airbus pour les communications entre les applications critiques. Le standard est basé sur la technologie Ethernet commuté que nous avons présentée dans le paragraphe précédent. **AFDX** introduit le paradigme de liens virtuels (VL). Ce standard a été déployé avec succès sur les avions Airbus des gammes A380, A400M et plus récemment sur l’A350 xwb. Le standard a été développé afin d’introduire des notions de modularité et de réutilisation et pour réduire les coûts. Il a été conçu dans l’objectif de fiabiliser les échanges de données sur un modèle client/serveur, tout en introduisant l’aspect déterminisme manquant à Ethernet commuté.

Grâce à une large bande passante (jusqu’à 100 Mbps) et à l’introduction du concept de **Virtual Link (VL)** au niveau des commutateurs, le standard **AFDX** est capable de gérer des échanges importants de données tout en garantissant le respect des contraintes temporelles. Les liens virtuels représentent un concept important des réseaux **AFDX**. Ils offrent un moyen permettant d’émuler des liens multipoints des bus ARINC 429 en réservant une portion garantie de bande passante pour chaque flux transitant sur le réseau. Les **VL** représentent des chemins logiques unidirectionnels de communication ayant pour source un système d’extrémité et pour destination un ensemble de systèmes d’extrémités. Pour des raisons de déterminisme, les liens virtuels sont définis statiquement et sont caractérisés par :

- Un **Bandwidth Allocation Gap (BAG)** qui représente le temps d’inter-arrivée minimum entre deux trames, allant de 1 à 128ms (puissance de 2).
- Une taille de trame maximale (MFS), allant de 64 à 1518 octets, ce paramètre représente la taille maximale d’une trame pouvant être transmise pendant chaque **BAG**.

2.3. LES RÉSEAUX ETHERNET TEMPS RÉEL

Les systèmes d'extrémité **AFDX** ne sont pas synchronisés, chacun transmet des trames sur un ensemble de **VL**. Les transmissions étant multiplexées sur un même lien physique Ethernet, un ordonnancement sur les trames transmises doit alors être appliqué. Les systèmes d'extrémité source et destination ainsi que le réseau AFDX doivent disposer d'une configuration statique prédéfinie afin d'effectuer des communications de bout en bout tout en assurant une délivrance correcte des messages aux ports de destination correspondants.

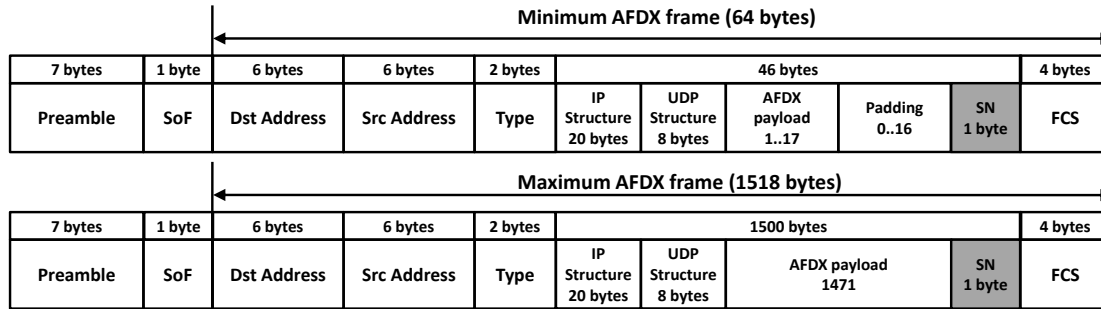


FIGURE 2.10 – Trame AFDX

Les trames **AFDX** sont présentées par la figure 2.10. L'entête Ethernet permet d'identifier les systèmes d'extrémité source et destination. La taille minimum d'une trame AFDX est équivalente à 64 octets, La taille maximum d'une trame **AFDX** est de 1518 octets.

Le standard **AFDX** apporte une nouvelle approche dans la conception des systèmes avioniques en introduisant des aspects de déterminisme, de modularité et de structuration dans la standardisation. Son développement et son déploiement sur différents types d'aéronefs en font un standard de fait pour l'avionique.

L'**AFDX** n'offre quasiment pas de possibilité de différenciation de trafic. Chaque port de sortie de commutateur offre uniquement deux niveaux de priorités. Cela ne permet pas de partager le réseau entre différents types de trafics.

La diversification des trafics transmis dans une voiture ou un avion et l'organisation de l'architecture du réseau embarqué autour d'Ethernet rend nécessaire un Ethernet offrant de la qualité de service. Dans le paragraphe suivant, nous présentons **TTEthernet**, qui intègre des mécanismes de QoS.

2.3.3 Time Triggered Ethernet (TTE)

TTEthernet est décrit par le standard SAE AS6802. Cette technologie réseau a été développée et mise sur le marché par la société TTTech Computertechnik AG. **TTEthernet** étend Ethernet en offrant des services déterministes permettant de couvrir les exigences des applications temps réel dur. Les architectures réseau **TTEthernet** permettent l'intégration de composants réseau

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

Ethernet commuté. Ceci, permet de faire cohabiter un trafic strictement temps réel avec un trafic Ethernet classique sur un même réseau. **TTEthernet** a spécialement été conçu pour les transmissions de données d'applications critiques. Le système doit être tolérant aux fautes dans le cas où un nœud, un commutateur ou une branche du réseau est défectueuse. Le standard SAE AS6802 fournit des mécanismes qui assurent la disponibilité du système lors de l'occurrence d'erreur. Le standard SAE AS6802 définit trois types de trafics :

- **Le trafic Time-Triggered (TT)** : La classe de trafic **TT** est réservée aux applications les plus contraintes. Les messages **TT** sont adaptés pour la transmission de données dans les systèmes distribués temps-réel. Tous les messages de types **TT** sont transmis sur le réseau à des instants temporels prédéfinis. Ces messages sont plus prioritaires que les messages des autres classes de trafic.
- **Le trafic Rate Constrained (RC)** : Les messages de cette classe de trafic (**RC** messages) sont utilisés par des applications ayant des exigences de déterminisme moindre que celles des applications qui utilise la classe de trafic **TT**. Contrairement aux messages de type **TT**, les messages **RC** ne sont pas transmis suivant une base temporelle commune aux nœuds. Différentes stations peuvent envoyer des messages **RC** à un même instant vers une même destination. Par conséquent, les messages **RC** peuvent être mis en file d'attente dans les commutateurs, ce qui augmente la gigue de transmission. La définition d'un trafic de type **RC** est similaire à la définition d'un **VL AFDX**.
- **Le trafic Best Effort (BE)** : Les messages **BE** suivent le mode de transmission Ethernet. Ainsi, aucune garantie sur les instants, les délais de transmission ou l'arrivée des messages aux destinataires n'est émise.

Les architectures réseaux et les transmissions **TTEthernet** s'appuient principalement sur les commutateurs qui sont chargés d'ordonnancer les transmissions des différentes classes de trafic. Ces classes permettent une ségrégation forte des différents flux réseau. Les messages de type **TT** sont transmis sur le réseau avec la priorité la plus élevée. Ils sont routés par les commutateurs conformément à un ordonnancement prédéfini. Un commutateur **TTEthernet** garantit, grâce à l'ordonnancement hors-ligne, que le médium est libre à l'instant de transmission des messages **TT**.

Les messages **RC** sont de moindre priorité que les messages **TT**; ils sont transmis sur le réseau lorsque aucune transmission de type **TT** n'est en attente. Les commutateurs sont chargés d'ordonnancer les messages **RC** au niveau des ports de sorties.

Les transmissions Best-Effort sont les moins prioritaires sur le réseau ; elles peuvent être retardées ou annulées par des messages **RC** ou **TT**. Le commutateur utilise les reliquats de bande passante pour la transmission des messages **BE**. Ainsi, si aucune transmission **TT** ou **RC** n'est en cours, le commutateur transmet une trame Best-Effort.

TTEthernet intègre des communications synchrone et asynchrone sur un même réseau. Le trafic **TT** s'appuyant sur une synchronisation temporelle stricte du système, **TT**Ethernet spécifie un algorithme de synchronisation tolérant aux fautes, reposant sur un modèle maître/esclave. Dans une architecture réseau **TT**Ethernet, les systèmes d'extrémités et les commutateurs peuvent se voir assigner les rôles de **Synchronization Master (SM)**, **Compression Master (CM)** ou **Synchronization Client (SC)**. Pour synchroniser le réseau, un échange de trames Protocol Control Frames est initié.

TTEthernet spécifie une synchronisation en deux étapes: dans un premier temps, les stations **SMs** transmettent des Protocol Control Frames à la station **CM**. Cette station extrait à partir des trames de contrôle l'état des horloges locales des nœuds **SM** puis applique une fonction de compression sur les données extraites. Dans un second temps, la station **CM** transmet le résultat de la fonction de compression aux stations **SMs** dans de nouvelles trames Protocol Control Frames. Les stations **SMs** corrigent leurs horloges et propagent par la suite les trames reçues aux stations **SC**.

Des outils permettant le dimensionnement et la validation hors ligne d'un système **TT**Ethernet existent [24]. Ces outils permettent d'assurer que la bande passante pour les classes de trafic **TT** et **RC** est toujours suffisante selon les exigences des applications communicantes.

TTEthernet est souvent perçue comme une technologie fermée. Les paragraphes suivants présentent des solutions fondées sur des standards IEEE.

2.3.4 Audio Video Bridging (AVB)

Les réseaux Ethernet Audio Video Bridging sont dérivés des réseaux Ethernet commutés. Ils offrent une synchronisation précise, la régulation du trafic pour les flux média Audio/Vidéo, ainsi que l'identification des périphériques non **AVB**. Le standard **AVB** se base sur quatre documents séparés.

- IEEE 802.1AS [25] pour la synchronisation des applications temporellement contraintes dans les réseaux locaux.
- IEEE 802.1Qat [26] pour le protocole de réservation de flux (**Stream Reservation Protocol (SRP)**).
- IEEE 802.1Qav [27] pour la transmission des flux contraints.
- IEEE 802.1BA [12] qui spécifie la configuration par défaut des composants dans un réseau **AVB**.

2.3.4.1 Protocole de synchronisation

Les périphériques **AVB** échangent périodiquement des informations temporelles qui permettent aux extrémités de la liaison de synchroniser leurs horloges de référence très précisément.

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

Cette synchronisation précise a deux buts principaux:

- Permettre la synchronisation des flux multiples.
- Fournir une base temporelle commune pour l’envoi des flux audio/vidéo à un temps relatif commun aux destinations.

Le processus de synchronisation AVB suit le protocole IEEE 802.1AS qui lui même est un sous ensemble du standard IEEE1588. Un domaine temporel IEEE 802.1AS est formé en utilisant les périphériques du réseau répondant au standard IEEE 802.1AS. La synchronisation se fait par un échange périodique d’informations temporelles afin de garantir une synchronisation précise (chaque 125ms).

Un domaine IEEE 802.1AS est formé par l’ensemble des stations utilisant le standard IEEE 802.1AS. Une station maître (Best Master Clock, BMS), élue ou désignée en hors-ligne, fournit un signal de synchronisation sur lequel toutes les autres stations synchronisent leurs horloges. La synchronisation s’effectue en trois principales étapes.

- La sélection du best master clock dans le cas où il n’est pas désigné hors ligne.
- Le calcul du délai de transmission, qui se fait irrégulièrement à des valeurs aléatoires comprises entre 4 et 60 secondes.
- La diffusion des estampilles temporelles

La sélection du best master clock dans le cas d’une élection se fait en utilisant l’algorithme BMCS (Best Master Clock Selection). Un échange de qualité d’horloge est initié entre les différents périphériques de l’architecture réseau dans un domaine 802.1AS défini au préalable. La qualité d’une horloge est caractérisée par une priorité qui est configurable, par la source temporelle (horloge interne, GPS, ...), ainsi que par l’adresse MAC de la station source. Chaque périphérique compare sa propre qualité d’horloge avec les qualités d’horloges reçues. Si la qualité d’une horloge reçue à une station est meilleure que l’horloge locale, la station stoppe la diffusion de son horloge et l’émetteur est élu Best Master Clock. Si le BMC cesse d’émettre son horloge le processus d’élection recommence.

La diffusion des estampilles temporelles se fait par l’envoi d’un message de synchronisation (Sync-MSG) suivi d’un message follow-up par le BMC. Le message follow-up contient l’estampille temporelle d’envoi du message Sync-MSG. Les nœuds recevant un message de synchronisation se synchronisent puis corrigent le message Sync-MSG et le retransmettent aux autres stations.

2.3.4.2 Politique de service des flux

Le fonctionnement des commutateurs AVB suit le standard IEEE802.1Qav [27] qui spécifie les conditions de transmission et d’enregistrement des trames dans les files d’attente, fournissant

des services audio/vidéo de qualité. Les commutateurs AVB implémentent une technique de lissage de trafic (**Credit Based Shaper (CBS)**) se basant sur les mécanismes de transmission offerte par IEEE802.1Q. Ce mécanisme est présenté plus en détail dans les paragraphes suivants. Le lissage de trafic est un processus qui permet de distribuer uniformément dans le temps les paquets. Si le lissage de trafic n'est pas effectué à la source et au niveau des commutateurs, les paquets peuvent potentiellement créer un bouchon de trafic (agglomération de paquets pouvant submerger les tampons dans des ponts, commutateurs et autres équipements de l'infrastructure).

AVB définit deux classes de réservation de flux (Stream Reservation traffic Classes) SRA et SRB qui définissent les files d'attente les plus prioritaires d'un port de communication. Un crédit est affecté à chacune de ces classes, il est initialisé à zéro. Les files d'attente SRA et SRB peuvent effectuer des transmissions uniquement si leur crédit est supérieur ou égal à 0. La Figure 2.11 illustre le fonctionnement du Credit Based Shaper.

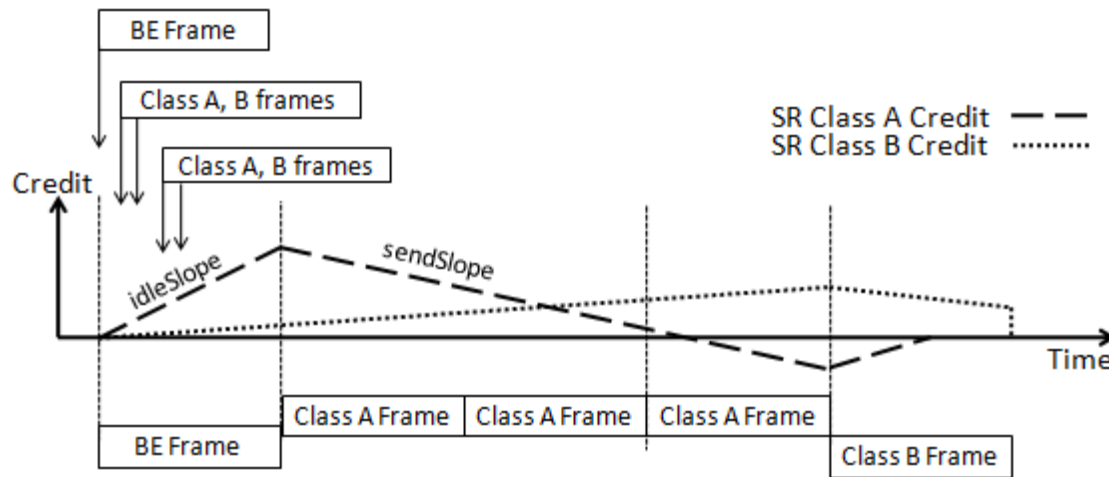


FIGURE 2.11 – Processus de régulation de trafic basé sur le crédit (Credit Based Shaper process)

Quand une file d'attente utilisant CBS transmet une trame, son crédit décline de manière linéaire au taux de *sendSlope* qui est le taux de changement du crédit quand la valeur du crédit est décroissante. Il est calculé par $sendSlope = idleSlope - portTransmitRate$. Quand le crédit d'une file d'attente CBS est négatif, il augmente de manière linéaire au taux de *idleSlope*. Il est calculé par $idleSlope = bandwidthFraction * portTransmitRate$ qui est la largeur de la bande passante en bits par seconde, réservée pour un flux. Cela se produit lorsqu'une trame d'une file d'attente utilisant le CBS est retardé par une trame de priorité plus faible ou par une file d'attente CBS de priorité plus élevée.

Ainsi, le crédit pouvant être positif, deux trames d'une même file d'attente peuvent être transmises l'une après l'autre. Cependant, les envois en rafales sont réduits (les quantités maximum

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

et minimum de crédit étant bornées). Si aucune trame n'est en attente dans la file, le crédit positif restant est abandonné. L'utilisation du CBS implique une borne supérieure sur le taux de bande passante accordé aux files d'attente de classe SR (des recommandations sont émises par IEEE802.1Qav), cette borne supérieure protège les files d'attente de priorité plus faible.

2.3.4.3 Protocole de réservation de flux (SRP)

Le mécanisme de lissage de trafic CBS ne permet de transmettre des trames de manière déterministe avec une latence et une gigue faible que si les ressources du réseau (bande passante, espace dans les tampons) sont disponibles tout au long du chemin de la station source à la station destination.

La terminologie AVB nomme les stations sources *talker* et les stations destination *listener*. Dans les architectures AVB, un *talker* et un *listener* doivent garantir que le chemin entre eux est disponible. Ils doivent aussi effectuer une réservation de ressources pour garantir que les flux AVB soient correctement transmis. Ce processus est spécifié par le standard IEEE802.1Qat [26] "Stream Reservation Protocol" (SRP). Ce protocole permet aux composants réseau (commutateurs et ponts) d'enregistrer un flux et de réserver les ressources nécessaires à travers le chemin parcouru par le flux (du talker au listener).

Un talker enregistre un flux en envoyant un message SRP "talker advertise message". Ce message inclut l'identifiant du flux (Stream ID) qui est composé de l'adresse MAC du talker en plus de 16 bits d'identifiant unique du talker ainsi que l'adresse MAC du listener. De plus, le "talker advertise message" contient la QoS requise par le flux (la classe de trafic AVB, ainsi que des informations sur le débit nécessaire) et la latence pire cas accumulée. Cette latence est recalculée par chaque pont, afin de permettre au listener de communiquer ces informations aux couches supérieures pour des motifs de synchronisation.

Chaque pont recevant un "talker advertise message" vérifie la disponibilité de la bande passante sur les ports sortants. Quand un pont bénéficie de ressources suffisantes sur le port sortant, le "talker advertise message" est propagé jusqu'à la prochaine station. Quand les ressources nécessaires ne sont pas disponibles, le pont ne propage pas le "talker advertise message", mais envoie au talker un message "talker failed message". Un code d'erreur ainsi qu'un identifiant du pont sont inclus dans ce message. Quand un listener reçoit un "talker advertise message", il doit savoir si les ressources sont disponibles, ainsi que la latence sur le chemin. Il pourra ainsi répondre par un "listener ready message" qui est transféré au talker. Les ponts intermédiaires utilisent le "listener ready message" pour verrouiller les ressources utilisées par le flux et l'enregistrer dans leur base de données des flux. Quand le talker reçoit le "listener ready message", il peut commencer la transmission du flux. Un talker ou un listener peuvent libérer les ressources réquisitionnées par un flux en le supprimant de leur base de données et en propageant un "de-registration message".

2.3.5 Time-Sensitive Networking (TSN)

En présentant la technologie [AVB](#), l'AVB task group a introduit des capacités temps réel à Ethernet. Comme AVB a été conçu pour des applications audios et vidéos, certains aspects obligatoires pour les applications industrielles et automobiles (tels que la redondance pour l'obtention d'un réseau tolérant aux pannes, par exemple) n'ont pas été pris en compte. Afin de répondre à ces exigences, une seconde génération d'[AVB](#) est en cours de développement sous l'appellation [Time Sensitive Networking \(TSN\)](#).

Comme présenté précédemment, [AVB](#) est décrit par un ensemble de quatre différents standards. Trois d'entre eux couvrent les différents aspects de cette technologie (IEEE 802.1Qav, IEEE 802.1AS et IEEE 802.1Qat) et le quatrième présente le contexte d'utilisation (IEEE 802.1BA).

La technologie [TSN](#) suit le même schéma de présentation que celle d'[AVB](#). [TSN](#) est présentée via un ensemble de sept différents standards. Six d'entre eux couvrent les différents aspects de la technologie (IEEE P802.1CB [28], IEEE P802.1Qca [29], IEEE P802.1Qcc [30], IEEE P802.1Qbv [31], IEEE P802.1Qbu [32] et IEEE P802.1ASbt [33]) alors que le septième, présente le contexte d'utilisation.

Trois des sept standards [TSN](#) décrivent les aspects liés au trafic temps-réel (IEEE P802.1Qbv, IEEE P802.1Qbu et IEEE P802.1ASbt). Trois autres standards [TSN](#) traitent de l'aspect de redondance (IEEE P802.1CB, IEEE P802.1Qca, IEEE P802.1Qcc). Nous décrivons brièvement chacun de ces standards. .

2.3.5.1 Les standards liés à l'aspect trafic temps-réel

1. **IEEE 802.1Qbv:** Ce standard se concentre sur le trafic ordonnancé. Ce type de trafic est hautement prioritaire, il n'est pas transmis selon le principe Best-effort ou FIFO, mais plutôt selon un ordonnancement temporel. Cela permet de prévenir des interférences provenant d'autres types de trafic. L'ordonnancement se base sur des informations dérivées de IEEE 802.1AS.
2. **IEEE 802.1Qbu:** Ce standard se concentre sur la préemption de trame. Ce mécanisme est principalement utilisé en combinaison avec un ordonnanceur TDMA (décrit par le standard IEEE 802.1Qbv). Sans l'utilisation de ce mécanisme, il est possible que la transmission d'une trame best-effort de grande taille bloque la transmission d'une trame contrainte.
3. **IEEE P802.1ASbt:** Ce standard vise à améliorer IEEE 802.1AS. L'objectif de cet amendement est de permettre au standard IEEE 802.1AS l'utilisation d'une plus grande variété de types d'horloge et de configurations réseaux. Tout comme IEEE P802.1AS, IEEE

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

P802.1ASbt est un profil d'IEEE 1588, il permet de réduire l'ensemble des options d'IEEE 1588 à un sous-ensemble d'options critiques applicables aux domaines automobile et industriel.

2.3.5.2 Les standards liés à l'aspect de redondance

1. **IEEE P802.1CB:** Ce standard décrit les mécanismes permettant d'identifier les trames nécessitant une transmission redondante, de dupliquer ces trames à la source et d'identifier et éliminer les duplicatas au niveau de la destination.
L'utilisation de la duplication permet d'accroître la fiabilité des flux transmis. A cet effet, les trames sont dupliquées en utilisant deux flux [TSN](#) distincts qui, à travers l'utilisation des protocoles décrits par le standard IEEE P802.1Qca, empruntent des chemins différents à travers le réseau. Ces mécanismes permettent d'obtenir des transmissions résistantes aux pannes lors de l'occurrence d'un problème sur l'un des chemins utilisés.
2. **IEEE 802.1Qca:** Ce standard décrit un nouveau protocole de contrôle permettant d'étendre l'application de [Intermediate System to Intermediate System \(IS-IS\)](#) au-delà des capacités de [Shortest Path Bridging \(SPB\)](#) pour contrôler les réseaux routés. Ce protocole doit rendre possible le contrôle explicite des chemins et ainsi ne pas utiliser le chemin le plus court pour les flux TSN redondants. Ceci permet, en addition à d'autres améliorations ajoutées au protocole, la réservation de plusieurs chemins requis pour une redondance transparente utilisant IEEE P802.1CB.
3. **IEEE P802.1Qcc:** Ce standard décrit les améliorations apportées au protocole [SRP](#) du standard [AVB](#) IEEE 802.1Qat-2010. Il permet d'obtenir des classes SR configurables, une meilleure description des caractéristiques des flux ainsi qu'une convergence déterministe de la réservation de flux.

Il est à noter que les standards IEEE Std 802.1Qbu-2016, IEEE Std 802.1Qbv-2015 et IEEE Std 802.1Qca-2015 sont les seuls standards publiés. Les autres standards de [TSN](#) restent encore au stade de projet.

2.4 Les réseaux sans-fil

Durant le 21^e siècle, avec la démocratisation d'internet, les réseaux locaux ont vu une évolution importante grâce à la popularisation des terminaux mobiles. Cette popularisation a favorisé l'utilisation des réseaux locaux dans les milieux industriels et particuliers nécessitant de plus en plus de mobilité. Les réseaux locaux sans-fil [Wireless Local Area Network \(WLAN\)](#) et les réseaux personnels sans fil [Wireless Personal Area Network \(WPAN\)](#) sont nés de ce besoin. La

transmission des données est effectuée par ondes électromagnétiques à l'intérieur d'un bâtiment ou à plus grande échelle si besoin (aéroports, usines, ...). Les réseaux locaux sans-fil et les réseaux personnels sans fil sont rattachés aux réseaux sans-fil qui sont classifiés en se basant sur la zone de couverture désirée. La figure 2.12 illustre cette classification.

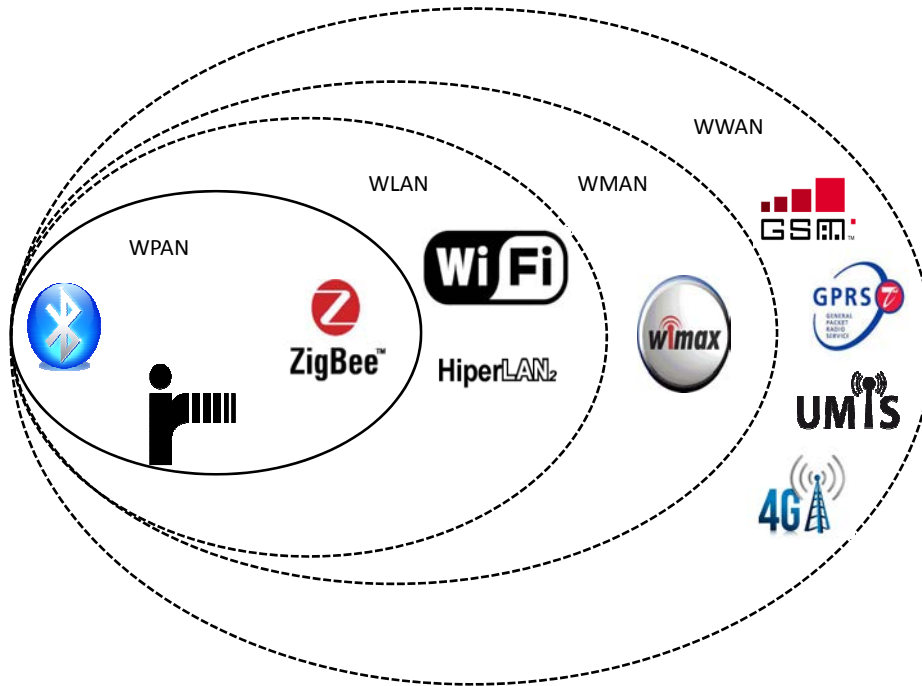


FIGURE 2.12 – Classification des réseaux sans fil

Dans les paragraphes suivants, nous abordons la description et la présentation des réseaux locaux et personnels sans-fil. Les utilisateurs des réseaux sans-fil sont équipés de terminaux mobiles, qui de par leur nature radio favorisent l'aspect mobilité des utilisateurs. Les technologies de type **WLAN** (IEEE 802.11) et **WPAN** (ZigBee et Bluetooth), sont très répandues dans les entreprises et chez le grand public. La standardisation, la disponibilité, le prix de ces technologies ainsi que la disponibilité gratuite de leur bande de fréquence a fait que ces mêmes technologies sont reprises dans le domaine industriel. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à WiFi, qui est souvent vu comme un Ethernet sans fil. Il est à noter que, plusieurs technologies sans-fil spécialisées pour le domaine industriel ont été développées, parmi elle WirelessHART [34] et ISA100a [35]. Ces technologies visent des applications spécifiques, en particulier les applications de collecte de données capteurs.

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

Les sections suivantes décrivent les standards IEEE 802.11, Bluetooth et ZigBee. Nous décrivons brièvement Bluetooth et ZigBee alors que nous détaillons le standard IEEE 802.11, la pile protocolaire ie; la couche physique, et la couche liaison de données (les couches basses du modèle OSI) ainsi que les méthodes d'accès au support (les méthodes d'accès distribués et centralisés) sont présentées en détail.

2.4.1 Le standard IEEE 802.11 (WiFi)

Le standard 802.11 offre des architectures cellulaires et prévoit deux modes de fonctionnement, un mode infrastructure et un mode Ad hoc. Les stations d'une même cellule forment un **Basic Service Set (BSS)** en s'associant pour établir des communications. Un **Basic Set Area (BSA)** est la zone géographique occupée par les dispositifs d'un BSS (cellule). La figure 2.13 présente les différents modes qu'offre la norme IEEE 802.11. Le mode infrastructure se démarque par l'utilisation d'au moins un point d'accès **Access Point (AP)** (nous utiliserons cette appellation dans le reste du document) pour interconnecter et gérer les communications entre les différentes stations d'un BSS. Plusieurs BSS peuvent être interconnectés entre eux grâce à leur AP respectif et par l'intermédiaire d'un système de distribution **Distribution System (DS)**; ils forment ainsi un **Extended Service Set (ESS)**.

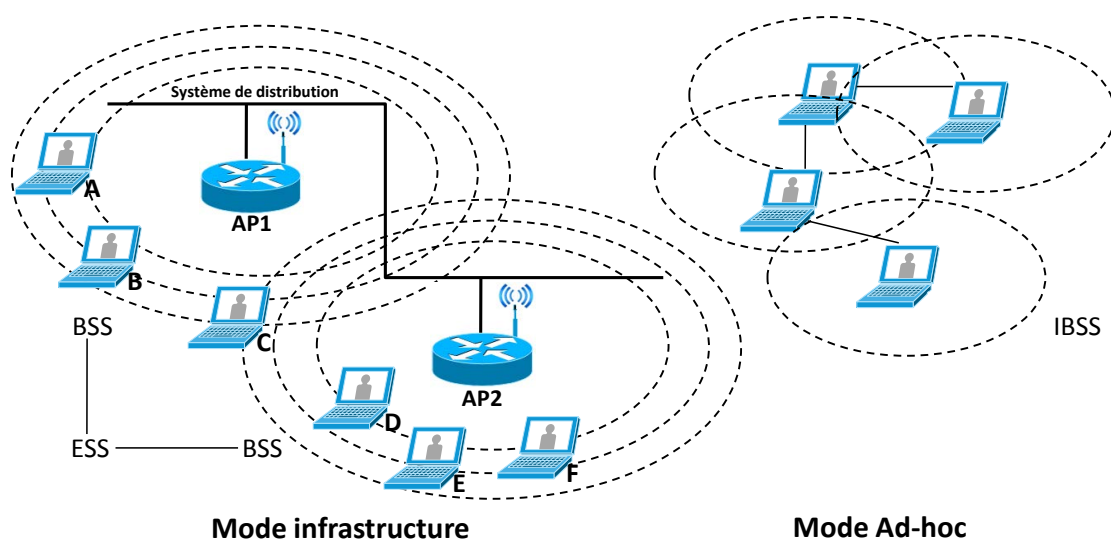


FIGURE 2.13 – Mode infrastructure et Ad Hoc d'IEEE 802.11

Le mode infrastructure est calqué sur le mode de fonctionnement des réseaux cellulaires: une zone géographique est couverte grâce à des AP. Les AP sont connectés à un réseau filaire, chaque nœud mobile doit se connecter au point d'accès pour accéder au réseau. Le mode infrastructure est illustré dans la figure 2.13.

Le mode Ad hoc ne nécessite pas l'utilisation d'un point d'accès, les liaisons se font directement entre stations à portée radio. Chaque nœud mobile actif du réseau a la capacité de transmettre directement des messages aux autres nœuds du réseau et sans intermédiaire. Un ensemble de dispositifs interconnectés forment un **Independent BSS (IBSS)**. Ce type d'architecture est utilisé dans les environnements où le mode infrastructure n'est pas nécessaire pour les services requis (aéroport, centre de conférence, réseau filaire interdit). Ce mode permet la création rapide de réseau, chaque nœud du réseau ne communique qu'avec les nœuds qui sont à portée radio.

IEEE802.11 définit une couche **MAC** pour toutes les couches physiques. Ainsi, une couche physique peut être développée sans qu'il ne soit nécessaire de modifier les protocoles de la couche **MAC**. Depuis l'apparition du standard en 1997, plusieurs améliorations ont été apportées à la couche physique. Le paragraphe suivant met en avant les principales améliorations apportées à IEEE802.11.

2.4.1.1 Les normes IEEE802.11

Les premiers standards de réseau sans-fil sont apparus il y a de cela une vingtaine d'années offrant des vitesses allant de 1Mb/s à 2Mb/s. Ils étaient dédiés dans un premier temps à des applications spécialisées dans des entrepôts ou dans des immeubles de bureaux afin de réduire le coût des câblages (l'aspect mobilité n'était pas principalement visé). La première norme 802.11 a été créée en 1997 [14] dans la bande des 900MHz; le standard proposa une première description des couche **MAC** et physique. Par la suite, plusieurs améliorations ont été proposées. En 1999, 802.11 partage sa bande avec d'autres réseaux sans fil tel que Bluetooth [15] à travers la bande des 2.4GHz ISM. Le tableau suivant présente un récapitulatif des principales normes IEEE 802.11.

Protocole	Date de normalisation	Débit Max Mbit/s	Fréquences
Initial	1997	2	2.4-2.5 GHz
802.11a	1999	54	5.15-5.35/5.47-5.725/5.725-5.875 GHz
802.11b	1999	11	2.4-2.5 GHz
802.11g	2003	54	2.4-2.5 GHz
802.11n	2009	450	2.4 GHz ou 5 GHz
802.11ac	2014	1300	2.4 GHz ou 5 GHz

TABLEAU 2.1 – Récapitulatif des normes IEEE802.11

Dans cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement au standard IEEE 802.11g [36]. Le standard implémente un procédé de codage, **Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)** [37] (dérivant de 802.11a) pour sa couche physique. Ainsi, 802.11g peut atteindre des vitesses de 54Mbits/s tout en étant compatible avec les équipements de la norme IEEE 802.11b.

2.4.1.2 La couche physique IEEE802.11

À l'origine, Le standard IEEE802.11 a défini trois couches physiques, [Frequency Hopping Spread Spectrum \(FHSS\)](#) [38], [Direct-Sequence Spread Spectrum \(DSSS\)](#) [39] et IR (Infrarouge). Ces couches, définissent le format des trames, la méthode de transmission et le type de modulation. La couche physique a été par la suite enrichie pour définir trois nouvelles couches physiques, [High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum \(HR-DSSS\)](#) [40], [OFDM-2.4GHz](#) et [OFDM-5GHz](#).

La couche [OFDM](#) a été exploitée par la norme 802.11 dans le but d'augmenter le débit de communication. [OFDM](#) est une technique de modulation qui fait appel au multiplexage par répartition des fréquences orthogonales définies tout d'abord dans la bande de fréquence des 5GHz, puis adaptée dans la bande des 2,4GHz. Cette technique permet de séparer les canaux pour éviter les interférences. [OFDM](#) permet d'obtenir des débits allant jusqu'à 54Mbit/s en répartissant le signal sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonales modulées individuellement à bas débit. Les données sont transmises en parallèle sur les différentes fréquences. Un signal est divisé en plusieurs sous signaux qui sont transmis sur 48 fréquences de porteuses. [OFDM](#) est mis en œuvre dans de nombreux protocoles réseau. Il a une meilleure efficacité spectrale et réduit les interférences inter symbole.

2.4.1.3 Vue d'ensemble de la couche MAC IEEE802.11

La couche [MAC](#) IEEE 802.11 met en place le protocole d'accès au canal. Sur les réseaux, avant toute tentative d'émission, la station émettrice vérifie si le support de transmission est libre. Cette procédure est effectuée sur les réseaux Ethernet grâce à [CSMA/CD](#). Ainsi, si le canal de transmission reste libre après une durée aléatoire, la station commence sa transmission sinon, la transmission est effectuée ultérieurement. Ce mécanisme n'est pas suffisant pour assurer la bonne réception des données, plusieurs stations peuvent initier leur transmission simultanément ce qui cause des collisions. La nature filaire du réseau fait que ces collisions sont facilement détectables. Après détection de collision, la transmission est effectuée après un temps aléatoire.

Dans un cadre sans fil, une station ne peut pas émettre et écouter en même temps. La détection de collision n'est donc plus possible. Un mécanisme d'accusé de réception systématique est donc mis en place. En outre le [CSMA/CD](#) est remplacé par le [Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance \(CSMA/CA\)](#) pour éviter autant que possible les collisions. Le délai aléatoire est généralisé à la première tentative de transmission.

La figure 2.14 résume les différents modes d'accès au support de communication proposés par IEEE 802.11 :

- Le mode [Distributed coordination function \(DCF\)](#) [41], implémente directement [CSMA/CA](#).
- Le mode [Point coordination function \(PCF\)](#) [42], est un mode gestion fondé sur une scrutation des stations par le point d'accès.

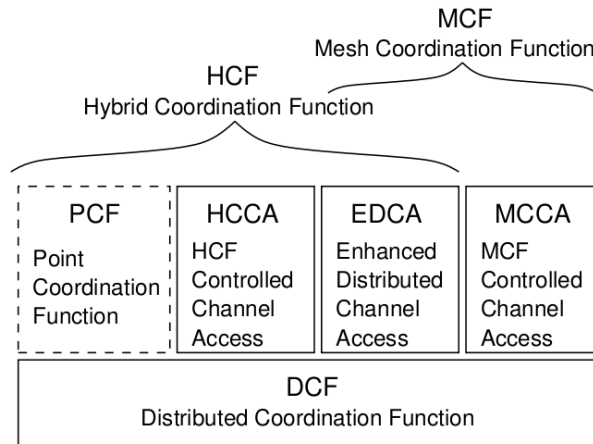


FIGURE 2.14 – Couche MAC IEEE802.11

- Le mode [Enhanced Distributed Channel Access \(EDCA\)](#) [43] est une évolution de [DCF](#) permettant de faire de la différenciation de trafic.
- Le mode [HCF Controlled Channel Access \(HCCA\)](#) est une évolution de [PCF](#).

Le mode DCF: Une station effectue une détection de porteuse pour déterminer si une communication est en cours. Si le canal est détecté libre pour une période de temps appelée [Distributed Inter Frame Space \(DIFS\)](#), la station transmet sa trame immédiatement. Si le canal est détecté occupé, alors la station retarde sa transmission jusqu'à la fin de la transmission courante. Dans ce dernier cas, la station sélectionne une temporisation b suivant un schéma exponentiel de temporisation. Si le médium est libre pendant une période de temps [DIFS](#), la temporisation est décrétementée de $aSlotTime$. L'intervalle de temporisation est décrétementé aussi longtemps que le canal est libre. La décrémentation de l'intervalle de temporisation est gelée dès que le nœud détecte une transmission sur le canal.

À la fin de cette transmission, dès que le canal devient libre pendant une période [DIFS](#), la décrémentation reprend. Dès que la temporisation b atteint zéro, la transmission est tentée immédiatement par la station. Après une transmission réussie, un acquittement (*ACK*) est envoyé par la station réceptrice après une durée de temps dite [Short Inter Frame Space \(SIFS\)](#). Si aucun acquittement n'est reçu par la station émettrice après un *EIFS* (Extended InterFrame Space), la transmission est réessayée.

Une nouvelle temporisation est uniformément choisie dans l'intervalle $[0, w - 1]$ où w est la fenêtre de contention. Cette fenêtre dépend du nombre de tentatives de transmissions infructueuses

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

de la transmission courante. À la première tentative, w est égal au minimum de la fenêtre de contention CW_{min} . Après chaque échec de transmission, la fenêtre de contention w est multipliée par deux jusqu'à atteindre la valeur maximale de la fenêtre de contention CW_{max} .

Le mode PCF: ce mode d'accès contrôlé, se base sur un AP qui contrôle le support et interroge les stations en utilisant un ordonnanceur Round-Robin afin de les autoriser à transmettre ou non. L'AP dispose d'une fonction de coordination qui détermine deux périodes temporelles:

- Une période de contention **Contention Period (CP)**, durant cette période la méthode d'accès est **DCF**.
- Une période sans contention **Contention Free Period (CFP)**, l'AP envoie des paquets **Contention Free-Pool (CFPool)** à chaque station, un à la fois, pour leur donner le droit d'envoyer un paquet.

La méthode d'accès au médium PCF n'est généralement pas implémentée.

Le mode HCCA: Un nœud sans fil demande une opportunité de transmission (*TXOP*) qui est un intervalle de temps où une certaine qualité de service (*QoS*) est offerte à une station particulière (*STA*) pour engager des séquences d'échange de trames sur le support sans fil. Un *TXOP* est défini par un temps de départ et une durée maximale. Durant l'intervalle *TXOP*, la station *STA* peut initier plusieurs séquences d'échange de trames.

Le mode EDCA: Ce mode définit quatre catégories de trafic, du moins prioritaire (trafic Best effort) au plus prioritaire (vidéo et voix). Tous les nœuds qui émettent dans une même catégorie d'accès *AC* sont en concurrence pour les *TXOPs* en utilisant chacun leurs propres ensembles de paramètres *EDCA* qui sont déterminés par le triplet ($AIFS[AC]$, $CW_{min}[AC]$, $CW_{max}[AC]$). L'*AC* de priorité la plus élevée a les valeurs de paramètres les plus basses. Ces valeurs permettent d'avoir une probabilité plus élevée d'accès au canal par rapport aux autres *AC*.

Lorsque plusieurs trames avec différentes *AC* sont en attente dans une file d'attente de sortie d'une même station, les collisions entre ces trames sont résolues dans la station de sorte que les trames de données de plus haute priorité entrent en compétition pour le canal alors que les trames de moindre priorité se comportent comme si une collision était détectée sur le médium réseau.

2.4.2 Bluetooth

Les premiers développements de Bluetooth ont été originellement proposés par Ericsson dès 1994, qui a été par la suite rejoint par près de 2000 entreprises pour former le groupe Bluetooth SIG afin de produire les spécifications 1.0 publiées dès juillet 1999 [44].

Bluetooth est une technologie de réseau sans fil de type [WPAN](#), de faible portée permettant de relier des nœuds réseau sans fil entre eux. Le médium radio Bluetooth apporte une souplesse d'utilisation inexistante pour ses concurrents qui nécessitaient une visibilité directe (technologies infrarouge IrDa). Le principal objectif de cette technologie est de permettre la transmission de données entre des nœuds réseau radio de faible coût, tout en offrant une faible consommation électrique.

Le standard Bluetooth propose trois classes différentes d'émetteurs qui offrent des portées allant de quelques mètres à une centaine de mètres dépendants de la puissance d'émission. Le tableau 2.2 résume les différentes classes d'émetteur. Les données sont transmises sur la bande de fréquence ISM à 2.4GHz. Le standard offre un débit théorique pouvant atteindre 1 Mbps.

Classe	Puissance (affaiblissement)	Portée
1	100 mW (20 dBm)	100 mètres
2	2,5 mW (4 dBm)	15-20 mètres
3	1 mW (0 dBm)	10 mètres

TABLEAU 2.2 – Caractéristiques Bluetooth

Un réseau Bluetooth peut contenir jusqu'à 8 nœuds interconnectés formant un réseau de type piconet. Le plus simple schéma de communication dans un piconet est créé par la connexion de deux nœuds ; un nœud maître et un nœud esclave. Dans le cas où plus de deux nœuds se connectent à un piconet, le nœud maître ordonnance les communications. L'interconnexion de plusieurs piconets forme un scatternets ; dans ce dernier cas, certains nœuds Bluetooth servent de passerelle.

La pile Bluetooth est composée de différentes couches :

- Une couche application.
- Une couche protocolaire (OBEX, WAP, UDP/TCP, IP, PPP).
- Une couche transmission (RFCOMM) pour l'émulation d'un port de transmission série.
- Une couche de communication audio.
- Une couche pour le système de communication Bluetooth.

Le système de communication Bluetooth est principalement formé des couches Baseband et Bluetooth radio qui correspondent aux couches liaison de données et physique.

La couche Baseband permet de commander la couche radio en fonction des données à transmettre. Les données sont transmises suivant un accès au médium [Time Division Duplex \(TDD\)](#).

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

Elles sont encapsulées dans des paquets et envoyées pendant des slots temporels de $625\ \mu\text{s}$. Un paquet de données peut être transmis sur un maximum de cinq slots de communication. Bluetooth utilise une modulation [Gaussian Frequency Shift Keying \(GFSK\)](#) [45]. Ainsi, une déviation de fréquence positive représente un bit de valeur 1 et une déviation de fréquence négative représente un bit de valeur 0, avec une déviation de fréquence maximale allant de 140KHz à 175KHz

La couche Bluetooth radio est la couche la plus basse du modèle. Elle s'occupe de l'émission/réception des ondes radio. Cette couche définit la bande de fréquence ainsi que l'arrangement des canaux. De plus, elle définit les différents types de lien entre les nœuds radio. Les principaux types de lien Bluetooth sont:

- Les liens [Synchronous Connection-Oriented \(SCO\)](#), synchrone full duplex entre un nœud maître et un nœud esclave avec une transmission de trame chaque 2, 4 ou 6 slots de temps.
- Les liens [Asynchronous Connection-Less \(ACL\)](#), qui sont des liens sans connexion entre un nœud maître et un nœud esclave.

Plusieurs versions de Bluetooth sont disponibles. Les versions 2.0 et 2.1 introduisent le mode [Enhance Data Rate \(EDR\)](#) qui permet d'atteindre un débit de 3 Mbps en utilisant différentes techniques de modulation. La version 4.0 ([Bluetooth Low Energy \(BLE\)](#)) permet de réduire la consommation énergétique mais offre un débit réduit par rapport aux versions 2.0 et 2.1 (environ 1 Mbps). La version 5.0 de Bluetooth, lancée en 2016 permet d'obtenir une portée quadruplée et un débit doublé en mode [BLE](#).

2.4.3 Zigbee

ZigBee est un ensemble de protocoles de communication haut niveau pour les transmissions à débit faible (250 Kb/s). ZigBee utilise des transmissions radio à consommation énergétique faible sur des étendues géographiques de petite taille. Il est basé sur la norme IEEE 802.15.4 [Low-Rate Wireless Personal Area Network \(LR-WPAN\)](#). Les premiers développements de ZigBee ont été effectués dès 1998, il a été normalisés dès 2003. Les transmissions ZigBee s'effectuent sur la bande de fréquence [Industrial, Scientific and medical radio bands \(ISM\)](#) sous trois fréquences différentes ; 868 MHz (1 canal), 915 MHz (10 canaux) et 2,4 GHz (16 canaux) offrant des débits respectifs allant jusqu'à 20 kb/s, 40 kb/s et 250 kb/s pour des distances de transmission allant de 1-100 mètre. Deux principaux types d'entités réseau sont identifiés par le protocole : les entités [Full Function Device \(FFD\)](#) et les entités [Reduce Function Device \(RFD\)](#).

Les réseaux ZigBee offrent plusieurs types de topologies ; topologie en étoile, topologie maillée et cluster. La topologie en étoile est généralement utilisée lorsque les nœuds d'extrémités sont proches les uns des autres, alors que la topologie maillée permet d'augmenter le nombre de liens

2.5. VERS DES ARCHITECTURES DE COMMUNICATION HÉTÉROGÈNES

entre les nœuds ; dans ce dernier cas, si un nœud tombe en panne, les autres nœuds peuvent retrouver d'autres chemins pour les transmissions.

Un réseau ZigBee typique consiste en un ensemble de nœuds de différents types. Un coordonnateur de type **FFD** qui concentre la totalité de la spécification 802.15.4 établit le réseau. Ce nœud connaît tous les autres nœuds du réseau et gère chacun d'entre eux, en plus de la gestion des transmissions sur le réseau. D'autres nœuds de types **FFD** peuvent être retrouvés dans le réseau dont le rôle est de servir comme routeur ou comme nœud d'extrémité.

Les nœuds d'extrémité retrouvés dans ces réseaux sont généralement de type **RFD**. Ils sont conçus dans un but de réduction maximale de la consommation énergétique. Ils sont souvent constitués de capteurs et d'actionneurs.

La couche physique 802.15.4 définit les caractéristiques physiques et électriques du réseau. Cette couche est responsable de la transmission/réception des signaux électriques ainsi que de :

- La modulation et le mapping des bits.
- L'activation/désactivation des émetteurs-récepteurs radio
- L'évaluation du canal.

ZigBee est une technologie sans fil basse consommation de faible coût permettant d'interconnecter des unités de types capteurs/actionneurs. Du fait de ses caractéristiques, ZigBee est plus particulièrement utilisé dans des domaines d'application tels que la domotique ou le contrôle de locaux professionnels.

Les paragraphes précédents ont introduit le fonctionnement de Wi-Fi, Bluetooth et de ZigBee ainsi que leurs principales caractéristiques. L'implémentation et l'utilisation de ces normes diffère selon les besoins des utilisateurs (couverture géographique, débit, nombre de nœuds réseau, consommation électrique). Le point commun de ces standards est qu'ils n'ont pas été conçus au départ pour des applications avec des contraintes de temps. Récemment, des solutions dédiées garantissant plus de déterminisme telles que WirelessHART ou ISA100a ont été proposées et commercialisées pour les applications d'automatisation industrielle. Ces standards peuvent être utilisés pour supporter des communications fortement contraintes temporellement.

2.5 Vers des architectures de communication hétérogènes

Dans un premier temps, les communications des systèmes embarqués reposaient sur des connexions point à point. L'adoption de ces connexions a introduit un poids non-négligeable dû au câblage et a complexifié les systèmes au fur et à mesure de l'ajout de nouvelles fonctions. Pour pallier ces problèmes, les liaisons point à point ont été remplacées par des moyens de communication partagés matérialisés dans un premier temps par des bus (principalement ARINC

429, [CAN](#), [LIN](#)).

Ces bus spécifiques permettent d'interconnecter un ensemble de capteurs à un ensemble d'actionneurs. Ils sont spécifiquement conçus pour permettre de garantir les délais de communication et respecter les différentes contraintes liées aux systèmes embarqués. Cependant, ces technologies présentent des problèmes de passage à l'échelle principalement liés au nombre de stations connectées et aux contraintes de câblage. D'autre part, les bus spécifiques présentent un débit de communication limité qui ne permet pas de faire face à l'augmentation du nombre d'applications communicantes et à la demande grandissante de bande passante. Afin de pallier ces problèmes, les principales solutions proposées permettant d'obtenir une augmentation de la bande passante et un passage à l'échelle efficace se basent sur le protocole grand public Ethernet et sur des composants sur étagère ([COTS](#)).

Ethernet ayant pour inconvénient intrinsèque sa méthode d'accès au médium non-déterministe, des évolutions orientées temps réel de ce dernier ont vu le jour ([TTEthernet](#), [AFDX](#), ...). Ces évolutions permettent de garantir des bornes supérieures sur les délais de communication. De plus, l'apport en bande passante de ces dernières permet de faire face à l'augmentation du nombre d'applications communicantes, mais implique le développement de systèmes d'extrémité (capteurs/actionneurs spécifiques et conformes au protocole réseau haut débit utilisé). Ces développements peuvent s'avérer relativement coûteux. De plus, le surcoût lié au protocole de communication s'avère très important lorsque des données de petite taille sont transmises. Ces technologies sont donc peu adaptées à l'interconnexion de capteurs et d'actionneurs.

Une bonne solution de compromis permettant de réduire les coûts de production et d'exploitation à leur minimum en réutilisant des composants préexistants consiste donc à interconnecter un ensemble de bus par un réseau fédérateur de type Ethernet temps réel ou autre. Cela permet de s'appuyer sur des solutions déjà déployées autour du bus. L'utilisation de bus classique ([CAN/LIN](#)/FlexRay) en conjonction avec un réseau haut débit permet d'obtenir une architecture réseau à deux niveaux où les capteurs et les actionneurs sont interconnectés par des bus et les bus sont interconnectés par un réseau fédérateur de type Ethernet temps réel ou autres.

La figure [2.15](#) présente une architecture réseau hétérogène. L'utilisation d'un réseau Ethernet temps réel dans ce type d'architecture implique le développement de passerelles permettant d'effectuer l'interconnexion entre les bus classiques et le réseau fédérateur Ethernet.

Les nœuds du réseau quels que soient leurs types correspondent aux entrées/sorties du réseau. Chaque nœud d'un réseau envoie ou reçoit un ensemble de flux qui sont émis via un port de sortie et reçus via un port d'entrée. L'accès au médium réseau diffère en fonction du protocole réseau utilisé. Les passerelles d'interconnexion entre les différentes technologies réseau sont responsables

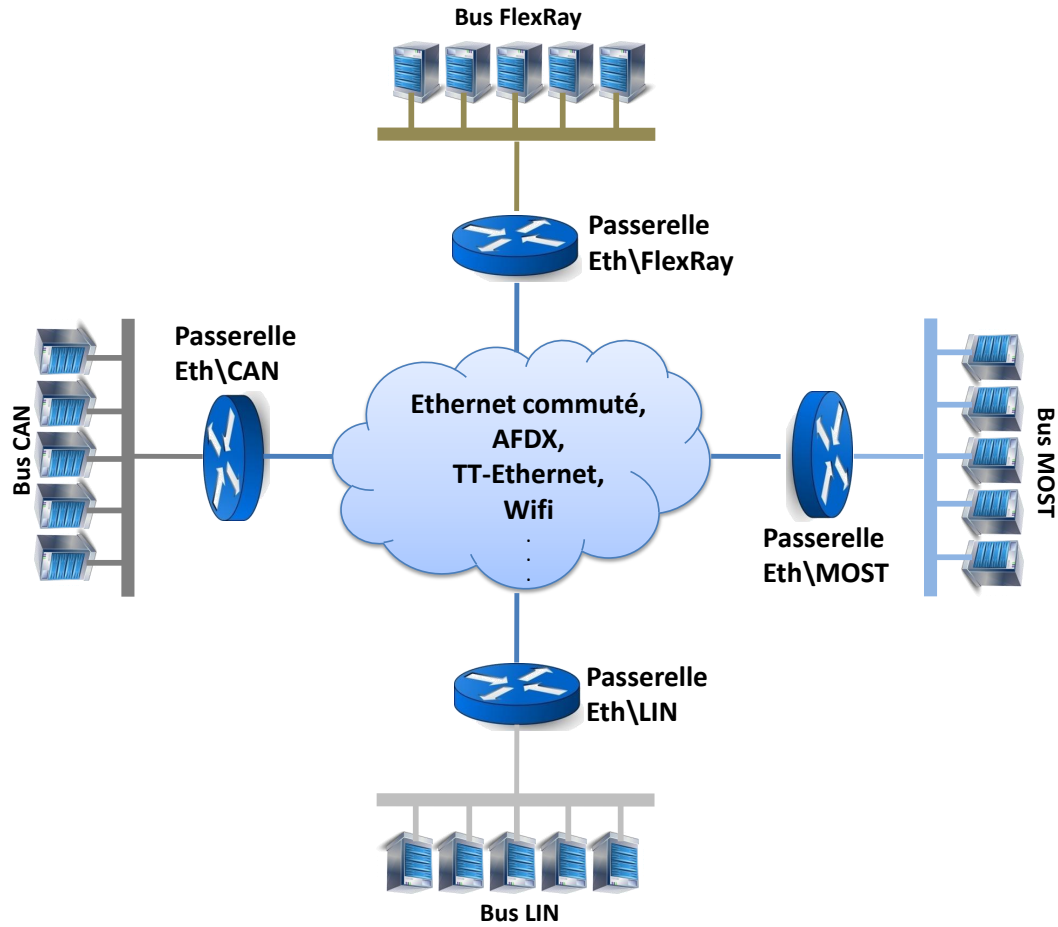


FIGURE 2.15 – Architecture réseau hybride automobile

de la mise en conformité des trames d'un flux lors du passage d'un type de réseau vers un autre.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps présenté l'évolution des réseaux embarqués. Puis nous avons décrit différentes technologies réseau dédiées au domaine automobile et au domaine avionique. De plus, nous avons présenté différentes solutions Ethernet orientées temps-réel et sans fil. Nous avons par la suite introduit les architectures de réseaux embarqués hétérogènes ainsi que la démarche qui mène à l'utilisation d'un tel type d'architecture réseau.

Dans le chapitre suivant, nous explicitons les objectifs des architectures embarquées hété-

2. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE RÉSEAUX EMBARQUÉES

rogènes. Nous présentons l'architecture réseau que nous considérons ainsi que les différentes hypothèses prises en compte afin de construire un modèle de simulation nous permettant de définir différents scénarios. Nous avons choisi de différencier les protocoles réseau envisagés selon leur cas d'utilisation, contraintes fortes ou contraintes souples.

Dans le **Chapitre 4**, nous montrons l'apport de la flexibilité des réseaux sans fil dans les architectures hétérogènes. Nous mettons cependant, l'accent sur les problèmes liés à la modélisation et l'utilisation de ces réseaux sans fil dans les architectures réseaux hétérogènes temps-réels et effectuons une analyse de faisabilité d'un tel concept. Une étude de cas nous permet de vérifier la faisabilité du concept et de comparer l'utilisation des différentes stratégies de passerelle.

Dans le **Chapitre 5**, nous traitons de l'utilisation des réseaux Ethernet commutés et AVB pour l'interconnexion de plusieurs bus CAN distants. Nous proposons différentes stratégies de passerelles et étudions l'impact de ces stratégies de pontage sur ces réseaux. D'autre part, nous montrons l'intérêt que peut avoir l'introduction d'un mécanisme de régulation de trafic sur une architecture hétérogène basée sur Ethernet commuté.

En conclusion du document, nous effectuons un bilan sur les différents concepts proposés, ainsi qu'un point sur les différentes études de cas présentées. Enfin, nous donnons quelques directions pour des travaux futurs.

3 Architecture embarquée hétérogène

3.1 Objectifs d'une architecture embarquée hétérogène

Comme introduit au chapitre précédent, une bonne solution de compromis consiste à interconnecter un ensemble de bus spécifiques par un réseau fédérateur de type Ethernet temps réel ou autre. Cela permet de s'appuyer sur des solutions déjà déployées autour de bus. On obtient alors une architecture de communication à deux niveaux.

- Localement, les capteurs et les actionneurs sont interconnectés par des bus.
- Globalement, des données sont échangées entre ces bus spécifiques via le réseau fédérateur.

Les contraintes associées aux données échangées peuvent être de plusieurs types.

- Temps réel contraint : une limite supérieure est imposée pour le délai de transmission de bout en bout de la donnée. Un dépassement de cette limite peut entraîner des conséquences catastrophiques pour le système.
- Temps réel non contraint : une limite supérieure est imposée pour le délai de transmission de bout en bout de la donnée. Toutefois, le dépassement de cette limite est tolérable si sa probabilité d'occurrence est faible.
- Meilleur effort : aucune limite supérieure n'est imposée pour le délai de transmission de bout en bout de la donnée. Il s'agit donc de faire au mieux pour minimiser le délai en moyenne.

Lorsque des données de type temps réel dur sont transmises via une technologie de communication, celle-ci doit permettre d'offrir des garanties sur les délais de communication. Lorsque ces données de type temps réel dur partagent le moyen de communication avec des données de types temps réel mou et/ou meilleur effort, la technologie doit permettre de différencier les différents types de données. Dans le cadre de cette thèse, nous considérons différentes technologies de communication, de façon à pouvoir répondre à ces contraintes diverses.

L'interconnexion de réseaux permet d'augmenter les capacités des bus spécifiques pour des coûts de développement relativement faibles. Néanmoins, l'utilisation d'architectures réseaux hétérogènes pose des défis de conception de système et de gestion de trafic. Plusieurs études ont adressé ce type d'architecture réseau.

3.2 État de l’art des architectures embarquées hétérogènes

Plusieurs études portant sur la modélisation des passerelles d’interconnexion ont été effectuées pour les domaines automobiles et avioniques. Les passerelles étant des éléments centraux de ces architectures hétérogènes, elles doivent garantir la cohérence des transmissions entre les différents protocoles et fournir une garantie temporelle sur les communications dans des domaines d’application où les contraintes temporelles sont strictes. Les études que nous présentons se focalisent sur ces dernières.

3.2.1 Une interconnexion CAN-Flexray

Plusieurs protocoles ont été proposés afin d’assurer les communications intra-véhiculaires. Le plus popularisé étant le protocole CAN. Le bas débit de ce protocole, l’augmentation du nombre de fonctions électroniques et l’apparition des applications x-by-wire ont poussé au développement de nouveaux protocoles tel que le protocole FlexRay.

FlexRay permet d’atteindre des débits allant jusqu’à 10 Mbit/s, mais, une transition brutale du protocole CAN vers le protocole FlexRay n’étant pas possible, des solutions de cohabitation entre FlexRay et CAN ont été proposés [46]. Dans cette étude, les auteurs présentent une méthode rapide de conversion des trames (de FlexRay vers CAN). Cette méthode permet d’intégrer un nœud FlexRay à un réseau CAN. La conversion est effectuée sur une base matérielle, ce qui permet d’avoir une méthode de conversion plus rapide qu’une approche classique par passerelle.

Par ailleurs, l’interconnexion d’un bus CAN à un bus FlexRay a été étudiée en considérant une approche par passerelle [47]. Cette approche, considère l’implémentation d’un algorithme de conversion de protocole (de CAN vers FlexRay et de FlexRay vers CAN) au niveau de la passerelle. Le processus de conversion proposé extrait les données d’une trame reçue du protocole source pour construire une trame conforme au protocole de destination. Plusieurs critères de conversion sont définis, parmi eux la taille du champ de données des trames CAN. Étant donné une taille de trame de maximum 8 octets pour le protocole CAN, la conversion d’une trame FlexRay contenant plus de 8 octets de données est problématique. Pour passer outre ce problème, les auteurs proposent de diviser les données Flexray en plusieurs blocs de 8 octets contenus dans plusieurs trames CAN. Cette approche a été expérimentée sur une plateforme physique qui a permis de montrer que les délais de traitement des trames sont bornés avec une faible gigue.

3.2.2 Une interconnexion CAN-AFDX

Les réseaux AFDX connaissent un essor important dans le domaine avionique ces dernières années. Ces réseaux sont employés notamment pour les communications de l’Airbus A380. Ils sont utilisés en combinaisons avec des bus plus classiques (CAN). L’interconnexion de ces réseaux

est effectuée via des **Remote Data Concentrators (RDC)**(standard ARINC 655). Une étude se focalisant sur les **RDC** standardisés a été menée [48]. Dans cette étude, les auteurs ont proposé des optimisations des **RDC** standard en introduisant différentes techniques permettant d'optimiser l'utilisation des ressources réseau tout en respectant les contraintes temps-réel imposées et le standard ARINC 655. Les deux principaux mécanismes proposés par cette étude sont:

1. L'encapsulation de trames
2. La régulation de trafic hiérarchique

Deux stratégies d'encapsulation de trames pour les flux montants (des différents bus vers les end-system AFDX) ont été proposées par les auteurs:

- Une stratégie d'encapsulation dynamique; les trames des bus spécifiques sont encapsulées dans une trame AFDX tant qu'un temporisateur au niveau du **RDC** n'a pas expiré.
- Une stratégie d'encapsulation statique; la décision d'encapsulation des trames est prise en hors ligne.

La régulation de trafic hiérarchique (HTS) consiste en l'utilisation de plusieurs régulateurs de trafic classés hiérarchiquement. Cette technique est appliquée aux flux descendants (des End system AFDX vers les bus). La régulation du trafic permet d'assurer une isolation entre les flux montants et les flux descendants.

Suite à l'introduction des différents mécanismes, les auteurs ont proposé une analyse temporelle. Cette analyse se base sur l'étude du délai de bout en bout et sur le calcul réseau. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation d'une stratégie d'encapsulation statique permettait d'avoir une meilleure utilisation de bande passante en comparaison à l'utilisation d'une stratégie d'encapsulation dynamique. D'autre part, l'introduction des régulateurs de trafic a permis de réduire les interférences des flux descendants sur les flux montants. Cela permet de réduire les délais pire cas des flux AFDX.

3.2.3 Une interconnexion CAN-Ethernet(CSMA/CD)-CAN

Une étude portant sur une architecture réseau interconnectant plusieurs bus CAN par un réseau Ethernet CSMA/CD a été proposée [49]. Cette architecture permet d'étendre l'utilisation des bus CAN. L'interconnexion des bus CAN au réseau Ethernet est effectuée via des passerelles implémentant des interfaces CAN/Ethernet.

L'objectif de cette étude est d'augmenter le nombre de nœuds CAN sur un réseau et ainsi améliorer le passage à l'échelle du bus CAN. Dans cette étude, une architecture purement CAN a été étudiée et des problèmes liés à la faible bande passante et à la faible zone de couverture des

réseaux CAN ont été relevés. Pour pallier ces problèmes, les auteurs ont proposé l'utilisation d'Ethernet en conjonction avec CAN pour les communications temps réel. La passerelle proposée implémente différentes stratégies d'encapsulation CAN/Ethernet. Ces stratégies consistent en l'encapsulation de plusieurs trames CAN dans une même trame Ethernet tous en respectant la taille maximale des trames Ethernet de 1500 octets. Quand la passerelle CAN/Ethernet reçoit une trame Ethernet, elle dés-encapsule les trames CAN contenues et les transmet sur le bus CAN de destination. Plusieurs stratégies d'encapsulation ont été prises en compte dans cette étude :

1. une stratégie d'encapsulation un pour un.
2. une stratégie d'encapsulation N pour un.
3. une stratégie d'encapsulation N pour un temporisé.

De la comparaison de ces stratégies, il est apparu que la stratégie 'N pour un temporisé' est le meilleur compromis entre les différentes stratégies lors de l'utilisation d'un réseau Ethernet classique pour interconnecter des bus CAN distants. Cette stratégie permet de réduire le nombre de collisions sur le médium en réduisant le nombre de trames transmises sur le réseau Ethernet. D'autre part dans cette étude, le choix d'Ethernet implique la non-possibilité de garantir un délai pire cas. Le mécanisme CSMA/CD (Carrier Senses Multiple Access with Collision Detection) étant non déterministe, garantir un délai est impossible.

L'objectif de cette thèse est de proposer et d'évaluer différentes architectures hétérogènes de réseaux embarqués permettant d'interconnecter des bus spécifiques par une technologie de type Ethernet ou sans-fil. Il s'agit de généraliser l'architecture de [49] en considérant des solutions différentes pour l'interconnexion des bus CAN.

L'architecture visée est décrite plus précisément dans le paragraphe suivant.

3.3 Présentation de l'architecture considérée

La figure 3.1 présente une vue d'ensemble des architectures de réseau hétérogènes étudiées dans le cadre de cette thèse.

3.3.1 Architecture générale

Cette architecture interconnecte un ensemble de n réseaux d'extrémité R^{ext_i} ($1 \leq i \leq n$) via un réseau fédérateur R^{feder} . Sur l'exemple de la figure 3.1, deux réseaux d'extrémité sont considérés ($n = 2$).

Trois types de stations sont considérés.

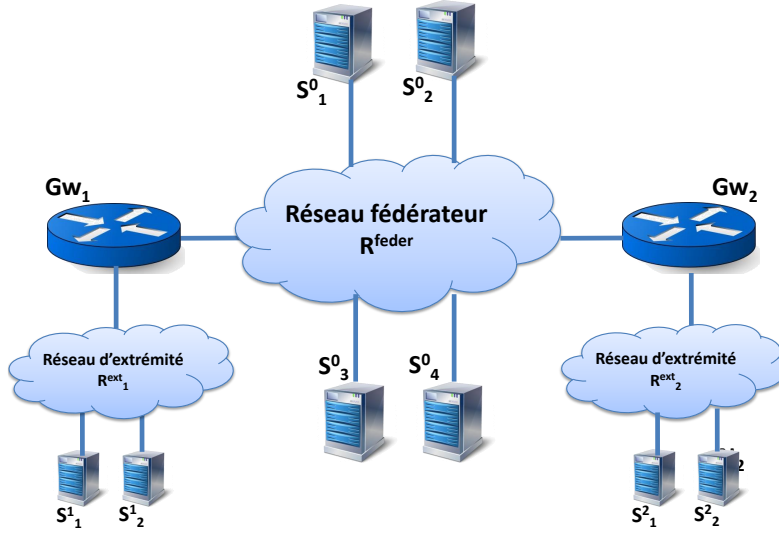


FIGURE 3.1 – Vue d'ensemble d'une architecture de réseau hybride

- Un ensemble de m_i stations $S^i = \{S^i_1, \dots, S^i_{m_i}\}$ est connecté à chaque réseau d'extrémité R^{ext_i} . Sur l'exemple de la figure 3.1, on a $S^1 = \{S^1_1, S^1_2\}$ et $S^2 = \{S^2_1, S^2_2\}$. Deux stations sont donc connectées à chacun des réseaux d'extrémité.
- Un ensemble de m_0 stations $S^0 = \{S^0_1, \dots, S^0_{m_0}\}$ est connecté au réseau fédérateur R^{feder} . Sur l'exemple de la figure 3.1, on a $S^0 = \{S^0_1, S^0_2, S^0_3, S^0_4\}$. Quatre stations sont donc connectées au réseau fédérateur.
- Une passerelle Gw_i est mise en œuvre entre chaque réseau d'extrémité R^{ext_i} et le réseau fédérateur R^{feder} .

3.3.2 Flux

Différents types de flux sont transmis sur cette architecture de réseau.

- Le premier type comprend n ensembles $F^{(i,i)}$ ($1 \leq i \leq n$) de flux locaux aux différents réseaux d'extrémité. Chaque ensemble $F^{(i,i)}$ se compose de $p_{(i,i)}$ flux $f^{(i,i)}_1, \dots, f^{(i,i)}_{p_{(i,i)}}$. Un flux a sa station source et toutes ses stations destination dans l'ensemble S^i des stations directement connectées au réseau d'extrémité R^{ext_i} . Les trames de ces flux ne transitent donc jamais sur le réseau fédérateur R^{feder} .
- Le second type comprend un ensemble $F^{(0,0)}$ de $p_{(0,0)}$ flux $f^{(0,0)}_1, \dots, f^{(0,0)}_{p_{(0,0)}}$ locaux au réseau fédérateur. Un flux a sa station source et toutes ses stations destination dans l'ensemble S^0 des stations directement connectées au réseau fédérateur R^{feder} . Les trames de ces flux ne transitent donc jamais sur les réseaux d'extrémité R^{ext_i} .

3. ARCHITECTURE EMBARQUÉE HÉTÉROGÈNE

- Le troisième type comprend $n \times (n - 1)$ ensembles $F^{(i,j)}$ ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, i \neq j$) de flux traversant chacun deux réseaux d'extrémité R^{ext_i} et R^{ext_j} ainsi que le réseau fédérateur R^{feder} . Chaque ensemble $F^{(i,j)}$ se compose de $p_{(i,j)}$ flux $f_1^{(i,j)}, \dots, f_{p_{(i,j)}}^{(i,j)}$. Un flux a sa station source dans l'ensemble S^i des stations directement connectées à R^{ext_i} et toutes ses stations destination dans l'ensemble S^j des stations directement connectées à R^{ext_j} . L'ensemble des trames de ces flux sont donc transmises, d'abord jusqu'à Gw^{ext_i} via R^{ext_i} , ensuite jusqu'à Gw^j via R^{feder} , enfin jusqu'à leurs stations destination via R^{ext_j} .

Il est à noter que plusieurs types de flux ne sont pas considérés:

- les flux ayant leur source sur un réseau d'extrémité R^{ext_i} et leur destination sur au moins deux réseaux d'extrémité différents R^{ext_j} et R^{ext_k} (avec $j \neq k$),
- les flux ayant leur source sur un réseau d'extrémité R^{ext_i} et au moins une de leur destination sur le réseau fédérateur R^{feder} ,
- les flux ayant leur source sur le réseau fédérateur R^{feder} et au moins une de leur destination sur un réseau d'extrémité R^{ext_i} .

Chacun des flux considérés est en outre défini par un ensemble de paramètres.

- La contrainte temporelle qu'il doit respecter : un délai de bout en bout maximum admissible $D_k^{(i,j)}$ peut être associé au flux $f_k^{(i,j)}$ (avec $0 \leq i \leq n$ et $0 \leq j \leq n$). Cette contrainte est typiquement associée au niveau de criticité du flux. Lorsque ce délai maximum admissible ne doit en aucun cas être dépassé, le flux est considéré comme temps réel dur. Lorsqu'un nombre limité de dépassements de ce délai est acceptable, le flux est temps réel mou. Lorsqu'il n'y a pas de délai maximum à respecter, le flux est meilleur effort. Pour avoir une définition homogène de l'ensemble des flux, on associe aux flux meilleur effort un délai de bout en bout maximum admissible $D_k^{(i,j)} = +\infty$.
- L'espacement entre les trames consécutives du flux $f_k^{(i,j)}$, défini par deux paramètres :
 - une durée $T_k^{(i,j)}$,
 - la signification $ST_k^{(i,j)}$ de cette durée $T_k^{(i,j)}$. $ST_k^{(i,j)}$ peut prendre deux valeurs :
 - *per* : le flux est strictement périodique, $T_k^{(i,j)}$ est donc la durée entre deux trames consécutives de $f_k^{(i,j)}$,
 - *exp* : la durée entre deux trames consécutives de $f_k^{(i,j)}$ suit une loi exponentielle de moyenne $T_k^{(i,j)}$.
- La longueur $L_k^{(i,j)}$ d'une trame du flux $f_k^{(i,j)}$, en octets. On considère que cette longueur est constante pour un flux donné.
- Les priorités associées au flux pour chacune des technologies de communication qu'il traverse.
 - Lorsque $i = j$, le flux $f_k^{(i,j)}$ traverse une seule technologie. Sa priorité sur cette technologie est définie par $P_{k,i}^{(i,i)}$. Les valeurs qu'elle peut prendre dépendent de la technologie

considérée.

- Lorsque $i \neq j$, le flux $f_k^{(i,j)}$ traverse trois technologies R^{ext_i} , R^{feder} et R^{ext_j} . Ses priorités sur ces technologies sont respectivement $P_{k,i}^{(i,j)}$, $P_{k,0}^{(i,j)}$ et $P_{k,j}^{(i,j)}$. Les trois valeurs peuvent être différentes. Elles dépendent là aussi des technologies considérées.
- Le chemin que suit le flux. Ce chemin est défini statiquement. Un flux peut être unicast (une seule station destination), ou multicast (plusieurs stations destination). Le chemin $CH_k^{(i,j)}$ du flux $f_k^{(i,j)}$ est donc défini par un arbre. Cet arbre est constitué d'un ensemble de couples de stations $(S_{j_1}^{i_1}, S_{j_2}^{i_2})$, $S_{j_1}^{i_1}$ étant un prédécesseur immédiat de $S_{j_2}^{i_2}$ dans l'arbre du flux $f_k^{(i,j)}$. La station source du flux est celle qui est présente dans l'ensemble des couples uniquement comme prédécesseur. Les stations destination du flux sont toutes celles qui sont présentes dans l'ensemble des couples uniquement comme successeur (elles y sont chacune une seule fois). Il est à noter que le graphe d'un flux ne contient pas de cycle.

3.4 Délai de bout en bout d'une trame

Le délai de bout en bout $d_k^{(i,j)}(l)$ d'une trame $tr_k^{(i,j)}(l)$ d'un flux $f_k^{(i,j)}$ est le temps écoulé entre la génération de $tr_k^{(i,j)}(l)$ par son nœud source et sa réception par l'ensemble de ses nœuds destination. Les flux multicast ayant plusieurs nœuds destination, on attendra donc qu'ils aient tous reçu la trame.

Le délai de bout en bout d'une trame peut être divisé en plusieurs parties :

- Le délai de transmission de la trame sur les liens qu'elle traverse : ce délai dépend du débit de chacun des liens et du nombre d'octets à transmettre (taille de la trame). Il peut donc être déterminé a priori.
- L'ensemble des délais technologiques pour la traversée des composants des différents réseaux (commutateurs, routeurs, ...) : ces délais sont directement liés aux composants utilisés et, en règle générale, ils sont connus a priori.
- Les temps d'attente dans les différentes stations et/ou composants réseau (hors délais technologiques) : ces temps d'attente comprennent deux parties :
 1. le délai entre le moment où la trame est prête pour accéder au support de communication et l'instant où la station lui autorise cet accès,
 2. le délai entre cet instant où la trame est autorisée à accéder au support de communication et l'instant où elle est effectivement complètement transmise avec succès.

La première partie dépend de la stratégie mise en œuvre par la station ou le composant. Cette stratégie est particulièrement importante au niveau des passerelles. Ce point sera détaillé à la section 3.5. La seconde partie dépend de la méthode d'accès mise en œuvre par la technologie de communication. A titre d'exemple, si la technologie utilisée est CAN, la trame devra attendre la fin de la transmission de la trame en cours et la transmission de toutes les trames en attente avec une priorité plus forte (i.e. un identificateur plus petit).

3. ARCHITECTURE EMBARQUÉE HÉTÉROGÈNE

Si la technologie utilisée est Ethernet CSMA/CD, la trame pourra être retardée par des collisions (entraînant des retransmissions).

La figure 3.2 illustre le délai de bout en bout pour une trame $tr_k^{(i,j)}(l)$ d'un flux unicast $f_k^{(i,j)}$ ($1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq n$, $i \neq j$), traversant deux réseaux d'extrémité R^{ext_i} et R^{ext_j} et le réseau fédérateur R^{feder} . Sur cette figure, on considère que R^{ext_i} et R^{ext_j} sont des bus à diffusion et que $tr_k^{(i,j)}(l)$ traverse un commutateur du réseau R^{feder} .

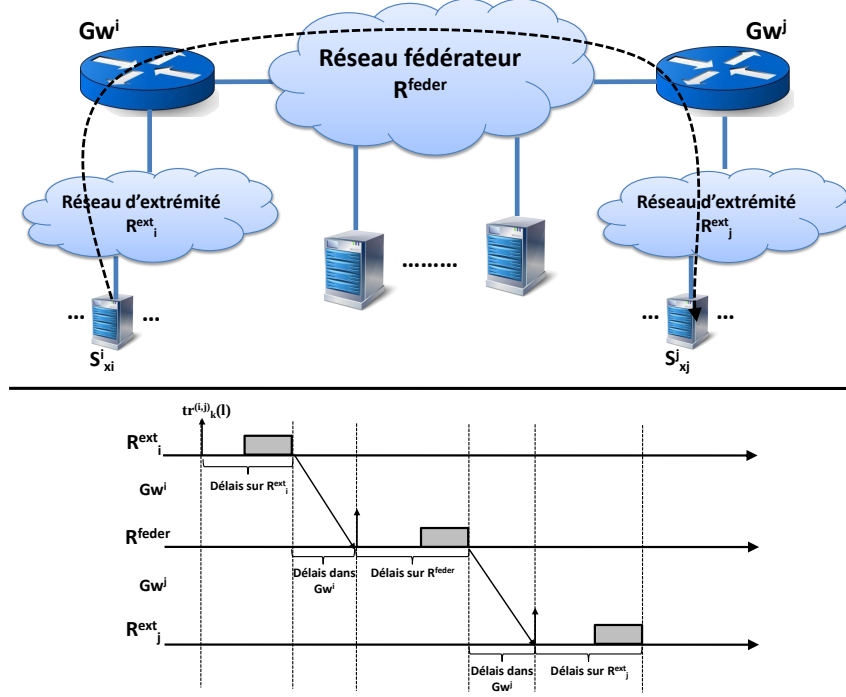


FIGURE 3.2 – illustration du délai de bout en bout d'une trame

Le chemin suivi par le flux est le suivant :

$$CH_k^{(i,j)} = \{(S_{x_i}^i, Gw^i), (Gw^i, Gw^j), (Gw^j, S_{x_j}^j)\}$$

Comme le montre la figure 3.2, les trames du flux $f_k^{(i,j)}$ sont générées par la station $S_{x_i}^i$. Elles sont transmises à la passerelle Gw^i via le réseau R^{ext_i} , puis à la passerelle Gw^j via R^{feder} , enfin à la station $S_{x_j}^j$ via R^{ext_j} .

3.5 Stratégies de passerelle

L'interconnexion de technologies de communication hétérogènes implique la mise en œuvre de passerelles entre ces technologies. Le rôle principal de chacune de ces passerelles est de prendre

en compte les différences entre les deux technologies qu'elle interconnecte.

Une première différence concerne le mécanisme d'adressage mis en œuvre par chacune des technologies. Des technologies comme Ethernet ou IEEE802.11 adressent des stations, tandis qu'une technologie comme CAN identifie les données.

Une deuxième différence concerne la taille du champ de données. Elle peut être très réduite (au plus 8 octets pour CAN) ou beaucoup plus grande (entre 40 et 1500 octets sur Ethernet, jusqu'à 2300 octets sur IEEE802.11).

Une troisième différence concerne les mécanismes de différenciation de trafic mis en œuvre.

Une quatrième différence concerne le débit, faible pour des solutions de type bus spécifique (au plus 1 Mbs pour CAN), beaucoup plus élevé pour des solutions de type Ethernet (100 Mbs, 1 Gbs, voire 10 Gbs).

La stratégie mise en œuvre dans une passerelle donnée doit permettre de garantir les contraintes des flux critiques tout en optimisant les performances pour les autres flux.

Deux stratégies de passerelles doivent être mises en œuvre, comme illustré sur la figure 3.3 :

- La première dans le sens bus spécifique vers réseau fédérateur (passerelle d'entrée),
- la seconde dans le sens réseau fédérateur vers bus spécifique (passerelle de sortie).



FIGURE 3.3 – Rôles des passerelles

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons et discutons les différentes alternatives pour ces deux types de passerelles.

3.5.1 La passerelle d'entrée

La stratégie de la passerelle d'entrée doit d'abord prendre en compte les différences de mécanismes d'adressage entre CAN et le réseau fédérateur. Il existe deux grandes approches pour faire suivre une trame d'une première technologie sur une seconde :

- la translation consiste à traduire la trame de la technologie source dans le format de trame de la technologie destination,
- l'encapsulation consiste à insérer la trame de la technologie source dans le champ de données de la trame de la technologie destination.

3. ARCHITECTURE EMBARQUÉE HÉTÉROGÈNE

Pour le type d'architecture considéré dans cette thèse, les modes d'adressage sont très différents (identification des données pour CAN, identification des stations pour le réseau fédérateur). Il apparaît donc judicieux d'utiliser une approche par encapsulation.

Cette approche par encapsulation peut être paramétrée de différentes manières. En particulier, la faible taille de la trame CAN (au plus 135 bits) autorise l'encapsulation de plusieurs trames CAN dans une trame Ethernet.

Nous illustrons différentes stratégies d'encapsulation sur le petit exemple de la figure 3.4.

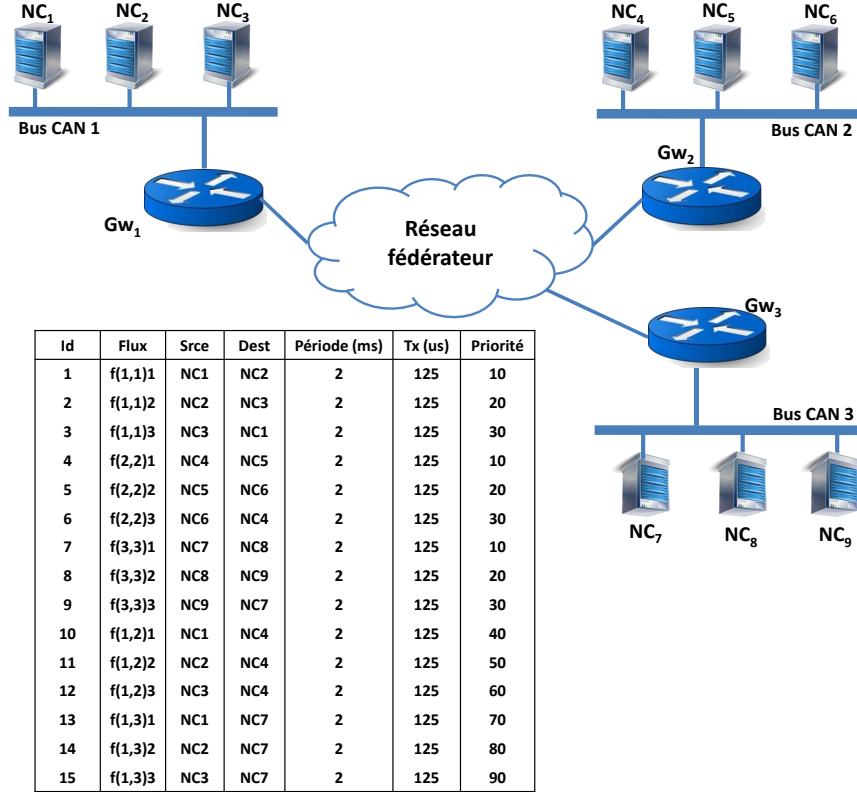


FIGURE 3.4 – Illustration des stratégies d'encapsulation

Cette exemple inclut trois bus CAN interconnectés par un réseau fédérateur qui peut être un lien Ethernet, un réseau Ethernet commuté ou un lien sans fil. Dans ce qui suit, on suppose uniquement que le champ de données de la trame du réseau fédérateur permet l'encapsulation d'au moins six trames CAN.

Les flux transmis sur cette architecture de communication sont regroupés en cinq ensembles :

- $F^{(1,1)} = \{f_1^{(1,1)}, f_2^{(1,1)}, f_3^{(1,1)}\}$: trois flux locaux au bus CAN 1,
- $F^{(2,2)} = \{f_1^{(2,2)}, f_2^{(2,2)}, f_3^{(2,2)}\}$: trois flux locaux au bus CAN 2,
- $F^{(3,3)} = \{f_1^{(3,3)}, f_2^{(3,3)}, f_3^{(3,3)}\}$: trois flux locaux au bus CAN 3,
- $F^{(1,2)} = \{f_1^{(1,2)}, f_2^{(1,2)}, f_3^{(1,2)}\}$: trois flux distants du bus CAN 1 vers le bus CAN 2,

— $F^{(1,3)} = \{f_1^{(1,3)}, f_2^{(1,3)}, f_3^{(1,3)}\}$: trois flux distants du bus CAN 1 vers le bus CAN 3.

Les flux locaux sont les plus prioritaires sur chacun des bus. Le temps de transmission d'une trame d'un flux quelconque sur un bus CAN est de $125 \mu s$.

Cet exemple n'inclut pas de flux locaux au réseau fédérateur. En effet, ce type de flux ne traverse pas de passerelle.

Pour alléger les figures illustrant les différentes stratégies d'encapsulation, un numéro est associé à chaque flux. Même si ces numéros reflètent l'ordre des priorités des différents flux sur chacun des bus, ils ne correspondent pas nécessairement aux identificateurs qui seraient associés aux flux, dans le cadre d'un déploiement de cette configuration.

3.5.1.1 Une trame pour une trame CAN

La solution la plus immédiate consiste à encapsuler chaque trame CAN distante dans une trame Ethernet propre. La figure 3.5 illustre cette stratégie sur la configuration de la figure 3.4, sur un scénario arbitraire de génération des trames des différents flux.

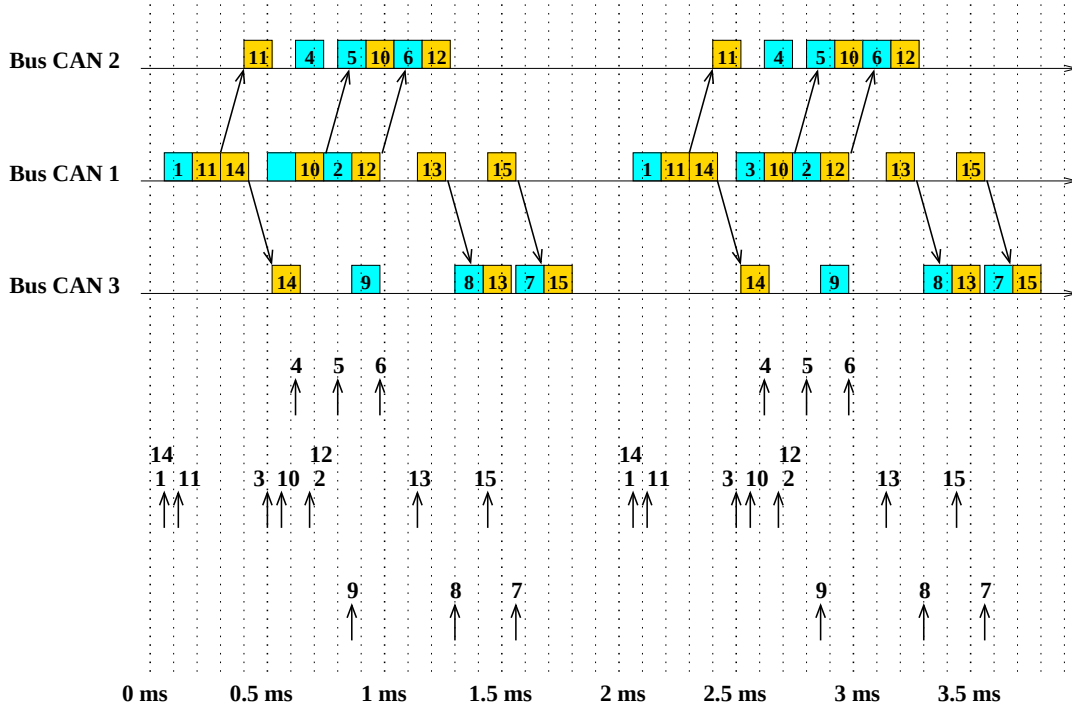


FIGURE 3.5 – Scénario avec une trame pour une trame CAN

Pour ce scénario, nous considérons que la transmission d'une trame entre deux passerelles, via le réseau fédérateur, dure toujours 0.1 ms . Nous considérons en outre que le délai de traitement dans la passerelle est nul, pour simplifier l'illustration de la stratégie de passerelle. Nous détaillons à présent la transmission des trames des flux distants. Toutes ces trames sont générées par des

3. ARCHITECTURE EMBARQUÉE HÉTÉROGÈNE

stations connectées au bus CAN 1.

- La première trame, générée à $t = 0.115$ ms, appartient au flux numéro 11 ($f_2^{(1,2)}$). Elle est transmise sur le bus CAN 1 dès la fin de la transmission de la trame du flux numéro 1 ($f_1^{(1,1)}$). Elle est en effet en compétition avec la trame du flux $f_2^{(1,3)}$ en attente du bus CAN 1 à cet instant. Elle est reçue par la passerelle *Gw1* à $t = 0.3$ ms. La stratégie de passerelle mise en œuvre consistant à encapsuler chaque trame CAN distante dans une trame séparée du réseau fédérateur, la trame du flux $f_2^{(1,2)}$ est immédiatement transmise et reçue par la passerelle du bus CAN 2 *Gw2* à $t = 0.4$ ms. Elle est décapsulée et, étant la seule trame en attente sur le bus CAN 2, elle est immédiatement transmise et reçue à $t = 0.525$ ms.
- La deuxième trame d'un flux distant transmise sur le bus CAN 1 appartient au flux numéro 14 ($f_2^{(1,3)}$). Elle a été générée à l'instant $t = 0.05$ ms, mais doit attendre, étant moins prioritaire que les trames des flux numéro 1 et 11. Elle est donc transmise à $t = 0.3$ ms et reçue par la passerelle *Gw1* à $t = 0.425$ ms. Elle est immédiatement encapsulée et transmise vers la passerelle du bus CAN 3 *Gw3*, qui la désencapsule et la transmet immédiatement sur le bus CAN 3, car il n'y a pas d'autres trames en attente.
- Suivant les mêmes règles, les trames des flux numéro 10, 12, 13 et 15 sont transmises.
- Une seconde période de deux millisecondes est montrée sur la figure 3.5. Elle est identique à la première.

Sur ce scénario particulier, nous obtenons donc les délais de bout en bout récapitulés dans la table 3.1 (Colonne 1-1).

Le point positif de cette stratégie d'encapsulation où chaque trame CAN est placée dans une trame séparée du réseau fédérateur est qu'elle limite l'attente dans la passerelle d'entrée. Le point négatif est qu'elle génère un nombre important de trames transmises sur ce réseau fédérateur. Cela peut entraîner des délais de transmission plus long sur le réseau fédérateur.

3.5.1.2 Une trame pour N trames CAN de même destination

Une solution pour réduire le nombre de trames transmises sur le réseau fédérateur consiste à grouper plusieurs trames CAN dans une même trame du réseau fédérateur. Ce groupement peut s'effectuer suivant deux stratégies :

- on ne groupe que des trames CAN ayant le même bus CAN de destination,
- on groupe les trames CAN sans tenir compte de leur bus CAN de destination.

La figure 3.6 illustre la première stratégie. Sur le scénario présenté, on considère qu'exactement deux trames CAN ayant le même bus CAN de destination sont encapsulées dans une trame du réseau fédérateur. Nous considérons toujours que la transmission d'une trame entre deux passerelles, via le réseau fédérateur, dure 0.1 ms et que le délai de traitement dans la passerelle est nul, dès lors que deux trames CAN sont en attente pour le même bus CAN de destination. Nous détaillons à présent la transmission des trames des flux distants.

- Les deux premières trames distantes générées et transmises sur le bus 1 appartiennent

Flux	1-1	2d-1	2-1	3d-1T	3-1T
$f_1^{1,1}$ - numéro 1	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
$f_2^{1,1}$ - numéro 2	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185
$f_3^{1,1}$ - numéro 3	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
$f_1^{2,2}$ - numéro 4	0.125	0.125	0.165	0.125	0.165
$f_2^{2,2}$ - numéro 5	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
$f_3^{2,2}$ - numéro 6	0.185	0.185	0.125	0.185	0.125
$f_1^{3,3}$ - numéro 7	0.125	0.220	0.125	0.125	0.125
$f_2^{3,3}$ - numéro 8	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
$f_3^{3,3}$ - numéro 9	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
$f_1^{1,2}$ - numéro 10	0.480	0.480	0.675	0.480	0.675
$f_2^{1,2}$ - numéro 11	0.410	1.185	0.535	1.185	0.535
$f_3^{1,2}$ - numéro 12	0.610	1.960	0.660	0.990	0.660
$f_1^{1,3}$ - numéro 13	0.400	0.400	0.660	0.660	0.660
$f_2^{1,3}$ - numéro 14	0.600	1.625	0.600	1.100	0.600
$f_3^{1,3}$ - numéro 15	0.370	1.335	0.495	0.495	0.495

- 1-1 : 1 trame CAN dans 1 trame du réseau fédérateur
2d-1 : 2 trames CAN de même destination dans 1 trame du réseau fédérateur
2-1 : 2 trames CAN de destination quelconque dans 1 trame du réseau fédérateur
3d-1T : Au plus 3 trames CAN de même destination dans 1 trame du réseau fédérateur avec attente bornée dans la passerelle
3-1T : Au plus 3 trames CAN de destination quelconque dans 1 trame du réseau fédérateur avec attente bornée dans la passerelle

TABLEAU 3.1 – Délais de bout en bout des flux (ms)

3. ARCHITECTURE EMBARQUÉE HÉTÉROGÈNE

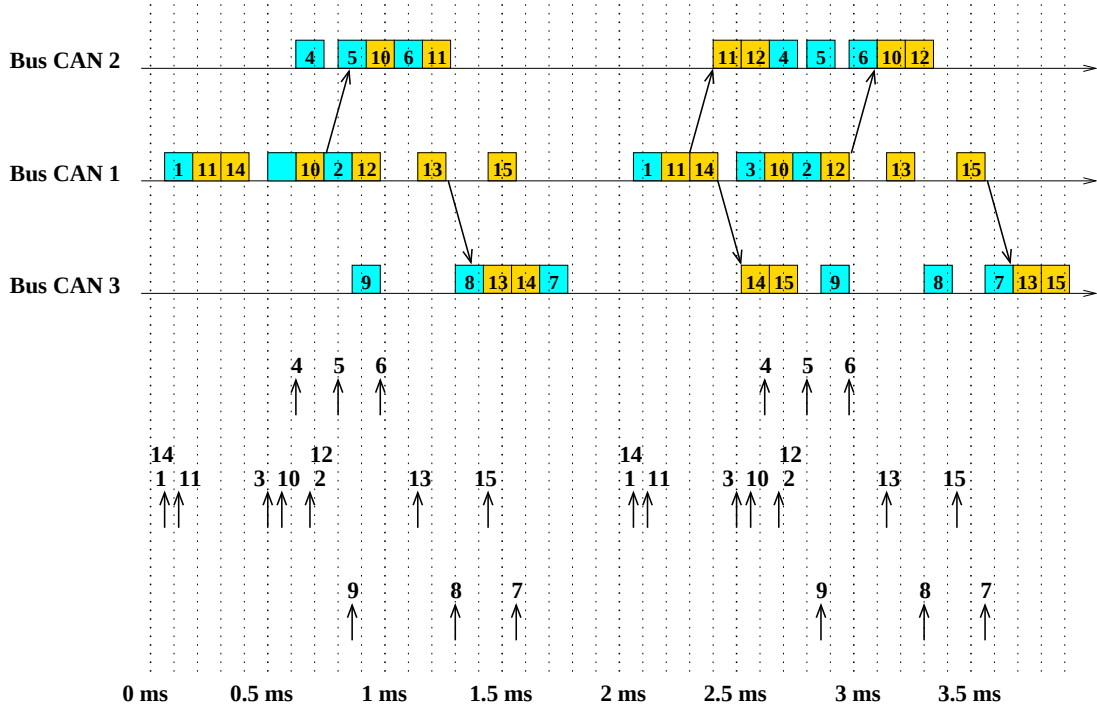


FIGURE 3.6 – Scénario avec une trame pour deux trames CAN même bus de destination

aux flux numéros 11 et 14. Elles ne sont pas à destination du même bus CAN (bus 2 pour la trame du flux 11, bus 3 pour la trame du flux 14). Elles ne peuvent donc pas être encapsulées dans la même trame du réseau fédérateur. Chacune d'elles doit attendre une autre trame CAN distante.

- La trame distante suivante appartient au flux numéro 10. Étant à destination du bus CAN 2, elle est encapsulée avec la trame du flux numéro 11 et transmise à la passerelle du bus CAN 2, via le réseau fédérateur. Cette passerelle désencapsule les deux trames qui sont alors transmises sur le bus CAN 2, en fonction de leur priorité. La trame 10 est transmise à l'issue de la transmission de la trame du flux numéro 5, car il n'y a pas de trames plus prioritaires en attente (il n'y a que les trames des flux numéros 10 et 11). Ensuite, la trame 11 doit attendre la transmission de la trame du flux numéro 6 (plus prioritaire), qui a été générée pendant la transmission de la trame du flux numéro 10.
- La trame distante suivante appartient au flux numéro 12. Étant à destination du bus CAN numéro 2, elle doit attendre une autre trame CAN distante avec le même bus de destination.
- La trame du flux numéro 14 est encapsulée avec la trame du flux numéro 13, dès réception de celle-ci. Après transmission via le réseau fédérateur, les deux trames sont alors désencapsulées et transmises sur le bus CAN 3.
- Les trames distantes suivantes sont gérées suivant le même principe.

Sur ce scénario particulier, nous obtenons donc les délais de bout en bout récapitulés dans la table 3.1. Ce délai de bout-en-bout peut augmenter de manière significative par rapport à la stratégie précédente (une trame pour une trame CAN). Cette augmentation est due au délai d'attente dans la passerelle: une trame CAN arrivant dans la passerelle doit attendre une deuxième trame CAN avec le même bus de destination.

Sur le scénario de la figure 3.6, l'impact sur le délai de la réduction du nombre de trames transmises sur le réseau fédérateur n'est pas pris en compte : le délai pour la transmission d'une trame sur le réseau fédérateur est considéré constant (0.1 ms). Nous verrons dans les chapitres suivants que cet impact peut varier de manière significative en fonction de la technologie de communication utilisée.

3.5.1.3 Une trame pour N trames CAN sans contrainte de destination

Cette stratégie est une variante de la précédente. On encapsule toujours un nombre donné de trames CAN dans chaque trame du réseau fédérateur. La différence est qu'une trame du réseau fédérateur peut contenir des trames à destination de différents bus CAN. Elle doit donc être diffusée à l'ensemble des bus CAN distants.

La figure 3.7 illustre cette stratégie. Sur le scénario présenté, on considère qu'exactly deux trames CAN sont encapsulées dans une trame du réseau fédérateur, sans tenir compte de leur bus CAN de destination. Nous considérons toujours que la transmission d'une trame entre deux

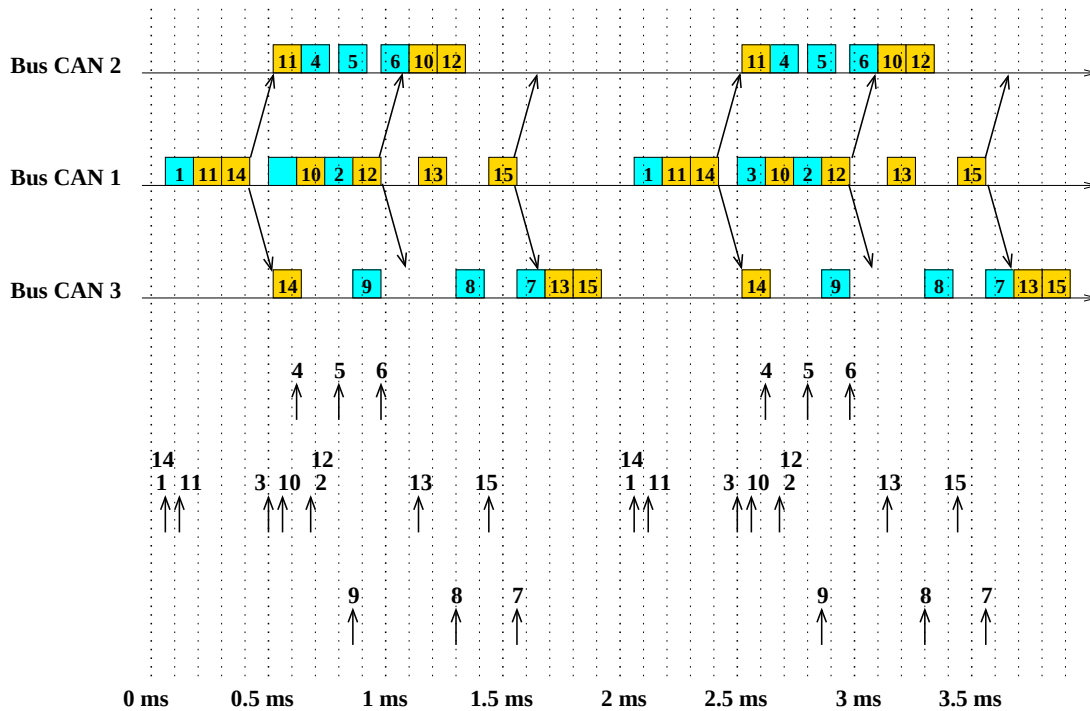


FIGURE 3.7 – Scénario avec une trame pour deux trames CAN sans contrainte de destination

3. ARCHITECTURE EMBARQUÉE HÉTÉROGÈNE

passerelles, via le réseau fédérateur, dure 0.1 ms et que le délai de traitement dans la passerelle est nul, dès lors que deux trames CAN sont en attente. Nous détaillons à présent la transmission des trames des flux distants.

- Les deux premières trames distantes générées et transmises sur le bus 1 appartiennent aux flux numéros 11 et 14. Elles ne sont pas à destination du même bus CAN (bus 2 pour la trame du flux 11, bus 3 pour la trame du flux 14). Elles sont néanmoins encapsulées dans la même trame du réseau fédérateur, qui est immédiatement transmise aux deux bus CAN distants. La passerelle du bus CAN 2 récupère la trame du flux 11, qu'elle transmet immédiatement, car il n'y a pas d'autre trame en attente. La passerelle du bus CAN 3 en fait de même avec la trame du flux 14.
- Les deux trames distantes suivantes transmises sur le bus 1 appartiennent aux flux numéros 10 et 12. Elles sont encapsulées et transmises aux bus CAN 2 et 3. Seule la passerelle du bus 2 exploite cette trame. La passerelle les transmet dès la fin de la transmission de la trame du flux 6.
- Les deux trames distantes suivantes (flux 13 et 15) sont encapsulées et transmises aux bus CAN 2 et 3 et exploitées uniquement par le bus 3.
- Ce comportement est ensuite répété périodiquement.

Les délais obtenus sur ce scénario sont récapitulés dans la table 3.1. Sur ce scénario, le retard engendré par le groupement des trames CAN est moindre que celui engendré par la stratégie précédente. Toutefois, la réduction du nombre de trames transmises sur le réseau fédérateur est aussi moindre.

3.5.1.4 Une trame pour N trames CAN de même destination avec attente bornée

Les deux stratégies précédentes permettent de réduire le nombre de trames transmises sur le réseau fédérateur, mais elles augmentent le temps moyen passé par une trame dans la passerelle d'entrée. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre le bon compromis entre la réduction du nombre de trames du réseau fédérateur et le délai dans la passerelle d'entrée, de manière à garantir les contraintes des flux distants.

L'idée consiste donc à borner l'attente de toute trame distante dans la passerelle d'entrée. La figure 3.8 illustre cette stratégie lorsque le temps d'attente dans la passerelle est borné à 0.5 ms. Nous considérons toujours que la transmission d'une trame entre deux passerelles, via le réseau fédérateur, dure 0.1 ms et que le délai de traitement dans la passerelle est nul, dès lors que le temporisateur de 0.5 ms pour une trame en attente est écoulé ou que le nombre maximum de trames CAN distantes pouvant être encapsulées dans une trame du réseau fédérateur (deux sur l'exemple) est atteint. Sur le scénario de la figure 3.8, la transmission des trames des flux distants s'effectue de la manière suivante.

- La première trame reçue par la passerelle appartient au flux numéro 11. Elle y arrive à $t = 0.3 \text{ ms}$. Elle doit donc être transmise dans une trame du réseau fédérateur au plus

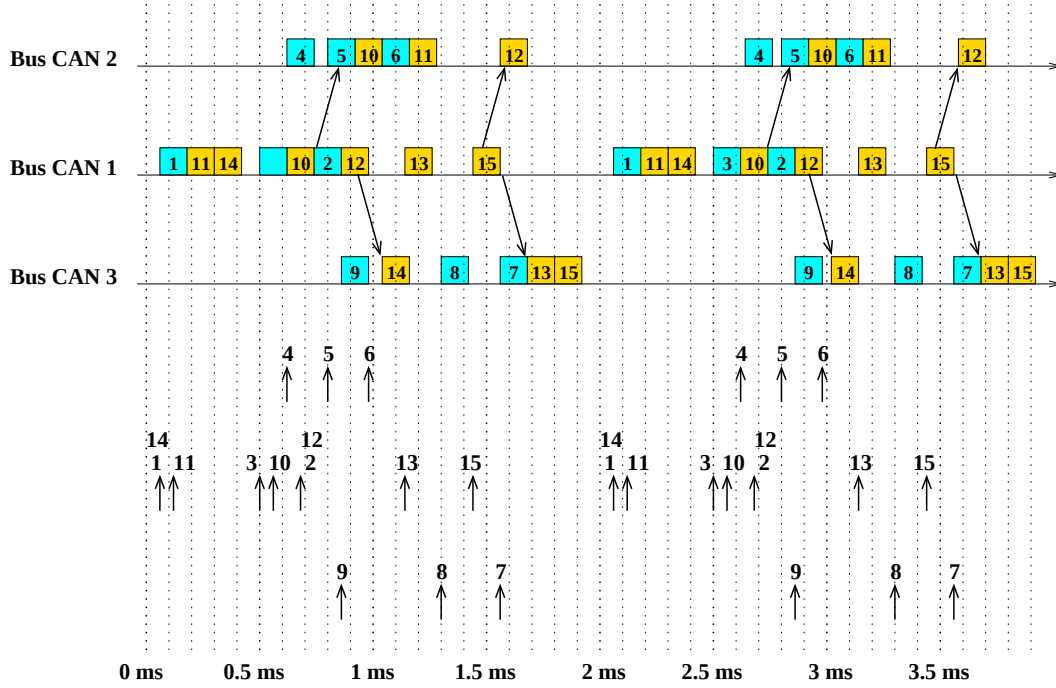


FIGURE 3.8 – Scénario avec une trame pour deux trames CAN même bus de destination, attente bornée à 0.5 ms dans la passerelle

tard à $t = 0.8 \text{ ms}$.

- La seconde trame est reçue par la passerelle à $t = 0.425 \text{ ms}$ et elle appartient au flux 14. N'étant pas à destination du même bus CAN, elle ne peut pas être encapsulée dans la même trame du réseau fédérateur.
- Une trame du flux 10 est reçue à $t = 0.750 \text{ ms}$. Elle est encapsulée avec la trame en attente du flux 11 et la trame résultante est immédiatement transmise sur le réseau fédérateur. En effet, le nombre maximum de trames CAN pouvant être encapsulées dans une trame du réseau fédérateur est atteint.
- A $t = 0.925 \text{ ms}$, aucune autre trame d'un flux distant à destination du bus CAN 3 n'est arrivée dans la passerelle. La trame du flux 14 est donc encapsulée et transmise seule sur le réseau fédérateur.
- Les trames suivantes de flux distants atteignant la passerelle appartiennent aux flux 12, 13 et 15. La trame du flux 12 est encapsulée et transmise sur le réseau fédérateur à $t = 1,490 \text{ ms}$, car elle a attendu 0.5 ms. Les trames des flux 13 et 15 sont encapsulées et transmises dans une même trame sur le réseau fédérateur, dès réception de la trame du flux 15 par la passerelle.
- La deuxième moitié du scénario de la figure 3.8 est identique à la première moitié.

Les délais obtenus sur ce scénario sont récapitulés dans la table 3.1. Le retard engendré par le

3. ARCHITECTURE EMBARQUÉE HÉTÉROGÈNE

groupement de trames diminue. Il sera toujours borné par la somme des délais sur les bus CAN et sur le réseau fédérateur, majoré de 0.5 ms.

3.5.1.5 Une trame pour N trames CAN sans contrainte de destination avec attente bornée

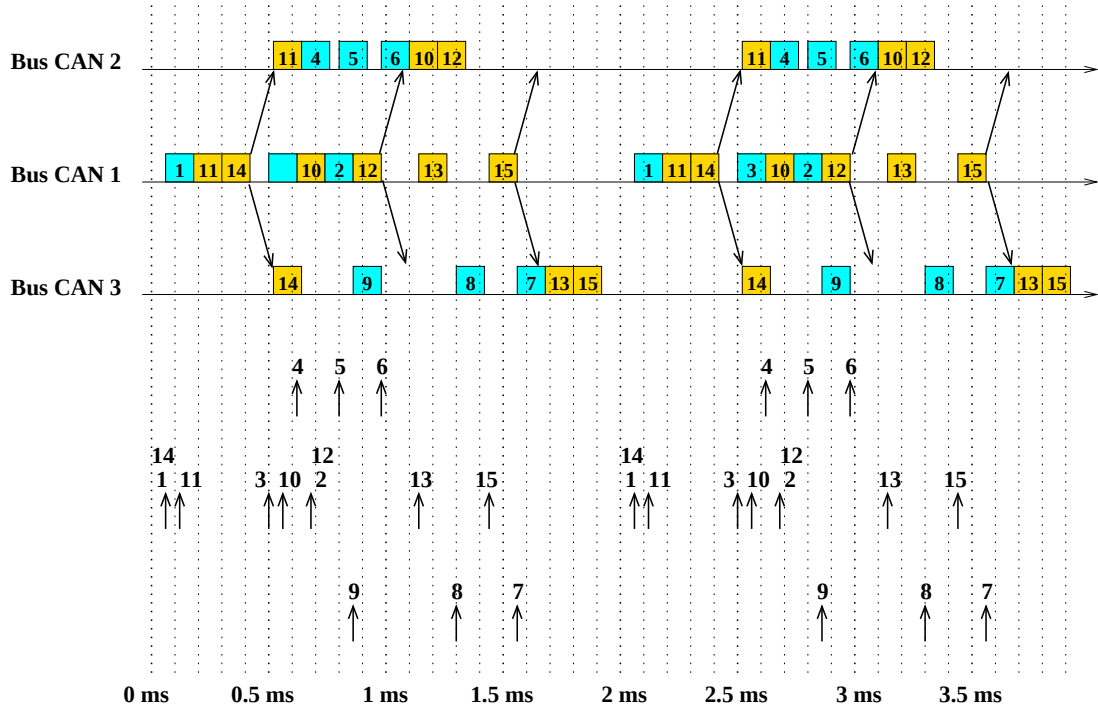


FIGURE 3.9 – Scénario avec une trame pour deux trames CAN sans contrainte de destination, attente bornée à 0.5 ms dans la passerelle

De la même manière que pour la stratégie sans temporisateur, une variante consiste à encapsuler des trames CAN dans des trames du réseau fédérateur, indépendamment de leur bus CAN de destination. La figure 3.9 illustre cette stratégie. Les mêmes valeurs de paramètres que pour la stratégie précédente sont considérées.

L'encapsulation et la transmission des trames CAN distantes s'effectue de la manière suivante.

- Les deux premières trames reçues par la passerelle appartiennent aux flux 11 et 14. Bien que n'étant pas à destination du même bus CAN, elles sont encapsulées et transmises dès l'arrivée de la seconde.
- Les deux suivantes appartiennent aux flux 10 et 12. Elles sont elles-aussi encapsulées et transmises dès l'arrivée de la seconde.
- Il en est de même pour les deux suivantes (flux 13 et 15).
- Ce comportement est reproduit sur la deuxième partie de l'exemple.

Sur cet exemple, le temporisateur n'a pas d'impact sur la transmission des trames distantes sur le réseau fédérateur. En effet, les trames CAN distantes étant groupées sans distinction de destination, la durée moyenne d'attente dans la passerelle diminue. Sur l'exemple de la figure 3.9, cette durée n'atteint jamais la valeur du temporisateur (0.5 ms).

3.5.2 La passerelle de sortie

La passerelle de sortie reçoit des trames du réseau fédérateur, dans lesquelles sont encapsulées des trames CAN. Elle doit donc effectuer les opérations suivantes :

1. récupérer l'ensemble des trames CAN encapsulées dans la trame du réseau fédérateur,
2. éliminer celles qui ne sont pas à destination du bus CAN connecté à la passerelle,
3. transmettre chaque trame CAN non éliminée sur le bus CAN de destination.

Les deux premières opérations entraînent un délai qui dépend de leur mise en œuvre et des capacités de la passerelle. La troisième opération peut être effectuée de différentes manières. Les paragraphes suivants illustrent deux stratégies représentatives.

3.5.2.1 Pas de régulation des trames CAN par la passerelle de sortie

C'est cette stratégie qui est appliquée pour tous les exemples illustrant les différents modes de fonctionnement d'une passerelle d'entrée (figures 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 et 3.9). La passerelle de sortie se contente de transmettre les trames CAN encapsulées sur le bus de destination, en fonction de leur priorité (i.e. le champ identificateur).

Par exemple, sur la figure 3.6, les trames des flux 10 et 11 sont reçues par la passerelle du bus CAN 2 à $t = 0.850\text{ ms}$. Elles sont immédiatement désencapsulées et prêtes à être transmises sur le bus CAN 2 (sur cet exemple, on suppose que la désencapsulation a lieu en temps nul). La trame 10, ayant l'identificateur le plus petit, est la première candidate à la transmission. Elle doit attendre la fin de la transmission en cours sur le bus CAN 2 (trame du flux 5). A la fin de cette dernière, la trame du flux 10 est la plus prioritaire en attente de transmission sur le bus CAN 2. Elle est donc transmise. Une trame du flux 6 devient prête pendant cette transmission. Elle est donc transmise avant la trame du flux 11, car son identificateur est plus petit.

Cette stratégie peut entraîner, sur le bus CAN de destination, une durée entre deux requêtes consécutives d'un flux donné qui est inférieure à la période de ce flux. C'est le cas pour le flux 11, qui est prêt à être transmis sur le bus CAN 2 aux instants $t = 0.850\text{ ms}$ et $t = 2.4\text{ ms}$ (1.55 ms), alors que sa période est de 2 ms .

3.5.2.2 Régulation des trames CAN par la passerelle de sortie

Cette stratégie vise à garantir que la durée entre deux requêtes consécutives d'un flux donné sur un bus CAN donné est toujours au moins la période de ce flux. Cette propriété est toujours vraie pour tous les flux générés par une station directement connectée sur ce bus CAN. En

3. ARCHITECTURE EMBARQUÉE HÉTÉROGÈNE

revanche, elle peut ne pas être vérifiée pour un flux distant, au niveau de son bus CAN de destination. Ce problème a été montré au paragraphe précédent, en considérant le flux 11 sur le bus CAN 2.

Une solution classique pour éviter ce problème consiste à réguler les flux distants sur leur bus CAN de destination. A chaque fois qu'une trame d'un flux distant est désencapsulée par une passerelle de destination, la passerelle détermine le temps écoulé depuis la dernière requête sur le même flux. Si ce temps est inférieur à la période du flux, la nouvelle requête sur le flux est retardée jusqu'à ce que la période soit écoulée.

Ce principe est illustré sur la figure 3.10. L'exemple montre l'arrivée des trois premières

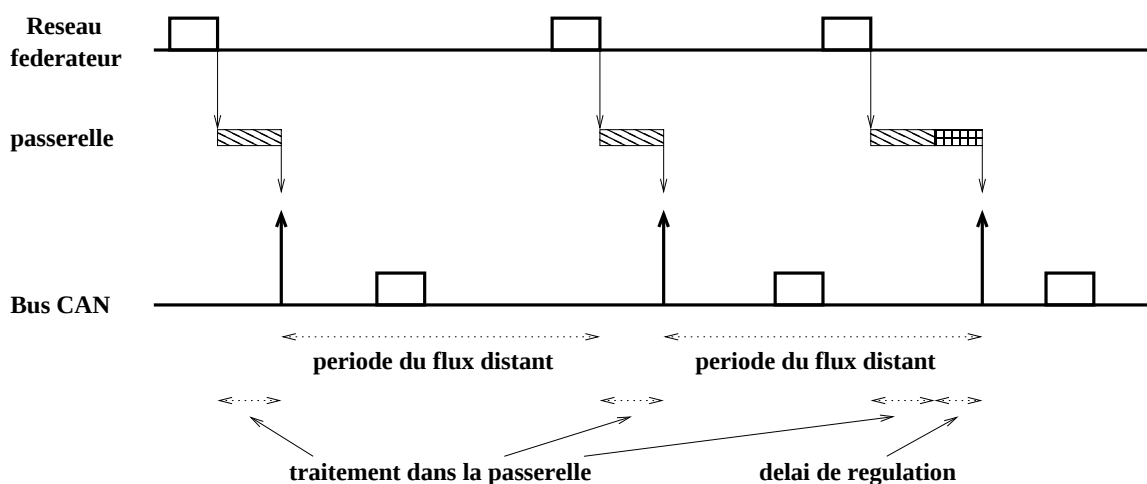


FIGURE 3.10 – Principe de la régulation par la passerelle de sortie

trames consécutives d'un flux distant.

- La première est désencapsulée par la passerelle (rectangle hachuré sur la figure 3.10) et immédiatement prête pour être transmise sur son bus CAN de destination. Elle est transmise sur ce bus en fonction de son niveau de priorité.
- La deuxième est désencapsulée par la passerelle. Le temps écoulé depuis la précédente désencapsulation concernant le même flux étant supérieur à la période du flux, la trame est immédiatement prête pour être transmise sur son bus CAN de destination. Elle y est transmise en fonction de son niveau de priorité.
- La troisième trame est désencapsulée par la passerelle. Cette fois, le temps écoulé depuis la précédente désencapsulation concernant le même flux est inférieur à la période du flux

3.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'introduire l'architecture réseau hétérogène que nous considérons dans le cadre de cette thèse. Les différents flux transitant sur cette architecture ont été présentés. Nous nous sommes particulièrement intéressés dans ce chapitre aux différentes passerelles d'interconnexion. Ces passerelles sont des éléments-clés dans ce type d'architecture. Nous avons ainsi présenté via différents exemples les différentes stratégies de passerelles possibles. De ces exemples, est ressortie la complexité de définir et de concevoir des passerelles permettant d'interconnecter plusieurs bus CAN distants via un réseau fédérateur utilisant une technologie réseau différente.

Dans ce chapitre, nous avons introduit pour les passerelles d'entrées (direction CAN vers réseau fédérateur) différentes stratégies d'encapsulation :

- Une trame CAN est encapsulée dans une trame
- N trames CAN ayant la même destination sont encapsulées dans une trame
- N trames CAN n'ayant pas de contraintes de destination sont encapsulées dans une trame
- N trames CAN ayant la même destination sont encapsulées dans une trame avec une attente bornée au niveau de la passerelle.
- N trames CAN n'ayant pas de contraintes de destination sont encapsulées dans une trame avec une attente bornée au niveau de la passerelle.

De plus, nous avons introduit pour les passerelles de sorties (réseau fédérateur vers bus CAN) deux stratégies :

- Pas de régulation des trames CAN par la passerelle de sortie.
- Régulation des trames CAN par la passerelle de sortie.

Nous avons considéré que le délai de transmission sur le réseau fédérateur est constant. Cela ne sera le plus souvent pas le cas. Ce délai va dépendre de la charge de ce réseau fédérateur et de la méthode d'accès qu'il met en œuvre.

Dans les chapitres 4 et 5, nous considérons deux réseaux fédérateurs. Pour chacun d'eux, nous comparons les différentes stratégies de passerelles introduites dans ce chapitre. Ces études de cas nous permettent d'appréhender l'impact de chaque stratégie sur le réseau.

La première étude de cas, considère un réseau fédérateur de type Wi-Fi. Nous montrons, qu'il est possible de limiter les échéances dépassées des trames CAN transmises sur le réseau sans fil, en exploitant intelligemment les différentes fonctionnalités des réseaux CAN et Wi-Fi. Ce type d'architecture est donc bien adaptée aux contraintes temps réel souples.

La deuxième étude, considère différents réseaux fédérateurs de type Ethernet commuté. Nous montrons, par le biais de cette étude, l'impact des différentes stratégies de passerelles d'entrées et de sorties sur les délais de bout en bout des flux ainsi que sur les performances globales des réseaux considérés.

4 Interconnexion par un réseau sans-fil

4.1 Introduction

Les développements récents de l'industrie des communications considèrent l'introduction des transmissions sans fil dans des architectures réseaux globales [50][51][52]. Ces technologies facilitent le déploiement des réseaux et permettent à différentes entités mobiles de communiquer de manière transparente (sans avoir recours à des connexions point à point filaires). Les technologies sans fil sont de manière générale moins fiables que les technologies filaires. En particulier, les interférences génèrent des erreurs de transmission. Cela peut clairement constituer un frein pour l'utilisation de ces technologies dans un contexte temps réel. L'utilisation du sans fil dans les contextes temps réel non critiques est toutefois envisagée.

Les premières études effectuées ont porté d'abord sur l'évaluation des technologies sans-fil traditionnelles tels que le Wi-Fi [14]), Bluetooth [15] ou ZigBee [16] dans un contexte temps réel. De nouveaux protocoles sans fil ont été ensuite spécifiquement développés [53][54][55][56][35] afin de répondre aux contraintes temps réel [34].

Dans ce chapitre, nous considérons l'utilisation d'un réseau de type Wi-Fi pour interconnecter des bus spécifiques distants. Wi-Fi est donc le réseau fédérateur de l'architecture réseau définie au chapitre 3. L'idée est d'utiliser un standard reconnu et éventuellement déjà déployé pour mettre en œuvre cette interconnexion. Une telle solution ne peut pas permettre de garantir des contraintes de délai strictes. Il n'est en effet pas possible de garantir un délai sur un réseau Wi-Fi. L'objectif de cette étude est donc d'évaluer le taux moyen de dépassement d'échéances. La simulation est un outil classique pour évaluer ce type de taux. Nous présentons donc une étude par simulation. Au préalable, nous illustrons l'impact de Wi-Fi sur les stratégies de passerelles présentées au chapitre 3.

4.2 Illustration de l'impact de Wi-Fi sur les stratégies de passerelle

La Figure 4.1 décrit un exemple d'architecture réseau hétérogène que cible cette étude. Dans cet exemple, quatre bus spécifiques sont interconnectés par un réseau sans fil local IEEE 802.11.

4. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU SANS-FIL

Afin d'interconnecter les différents bus spécifiques, quatre passerelles sans fil dédiées sont considérées. Ces passerelles sont composées d'un contrôleur temps réel et d'une interface sans fil IEEE 802.11. Nous considérons également la présence d'émetteurs sans fil dans cette architecture; le trafic généré par ces émetteurs est un trafic purement sans fil sans garantie temps réel (best effort). Tous les émetteurs sans fil sont connectés en mode ad hoc (Distributed Medium Acces).

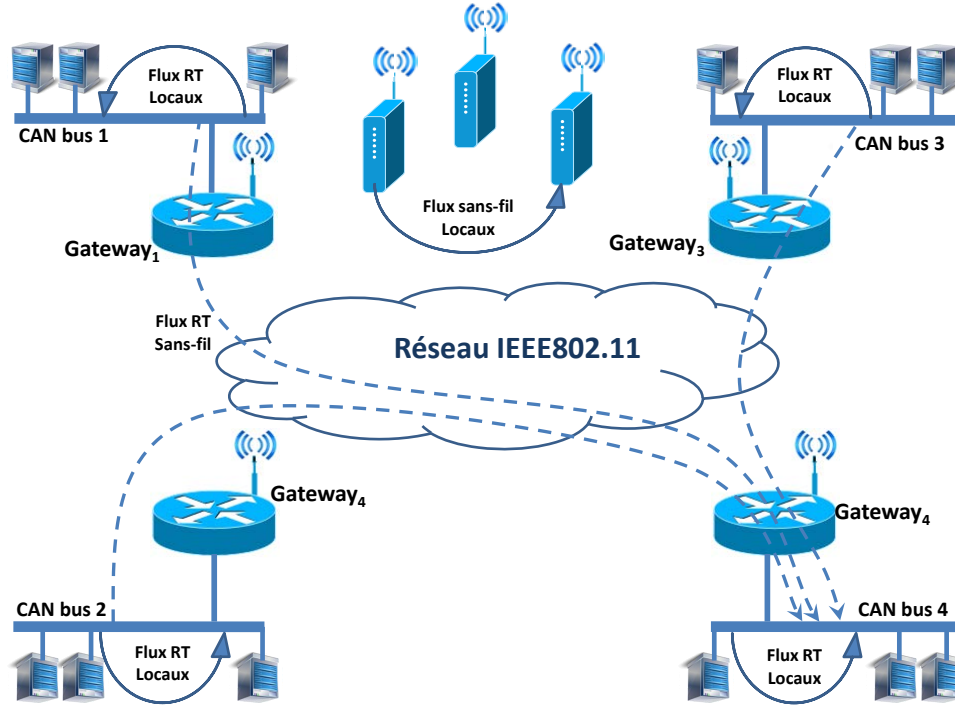


FIGURE 4.1 – Aperçu d'une architecture réseau hétérogène CAN/IEEE 802.11

4.2.1 Stratégies de passerelle

L'interconnexion entre chaque bus CAN et le réseau Wi-Fi est effectuée par des passerelles tel qu'indiqué dans la Figure 4.1. Comme chaque passerelle doit prendre en compte le mode d'adressage des différentes technologies réseaux CAN et Wi-Fi (les trames CAN utilisent un identifiant de donnée alors que les trames Wi-Fi utilisent une adresse source et une adresse de destination), l'utilisation d'une stratégie de passerelle par encapsulation de trames s'avère nécessaire afin d'éviter un problème de traduction du mode d'adressage.

Ainsi, si une trame f_1 d'un flux distant f_{CW_j} est reçue par une passerelle, elle est encapsulée dans une trame Wi-Fi f_2 . Cette trame est par la suite transmise à destination de la passerelle distante connectant le bus CAN de destination de la trame f_1 au réseau. Cette passerelle, recevant la trame f_2 , dés-encapsule la trame f_1 et la transmet sur le bus CAN de destination.

4.2. ILLUSTRATION DE L'IMPACT DE WI-FI SUR LES STRATÉGIES DE PASSERELLE

Les deux passerelles (encapsulation/dés-encapsulation) fonctionnent symétriquement. Cela permet d'établir des communications d'un bus CAN vers un bus CAN distant.

Pour illustrer les différentes stratégies de passerelle, nous nous appuyons sur l'exemple présenté dans le chapitre précédent (section 3.5). Cet exemple prend en compte un réseau hétérogène composé de trois bus CAN interconnectés par un réseau fédérateur pouvant être un lien Ethernet, un réseau Ethernet commuté ou un lien sans fil.

Dans ce qui suit, et contrairement à l'exemple présenté en 3.5, nous supposons que le réseau fédérateur considéré est un réseau Wi-Fi. Ainsi, le délai de transmission d'une trame entre deux passerelles n'est plus un délai fixe mais un délai induit directement par le réseau Wi-Fi. Nous considérons que des flux locaux au réseau Wi-Fi sont transmis.

De plus, nous rappelons que les flux locaux sont les plus prioritaires sur chacun des bus spécifiques. Le temps de transmission d'une trame d'un flux quelconque sur un bus CAN est de $125\mu s$.

Pour rappel, les différents flux transmis sur cet exemple sont regroupés en cinq ensembles :

- $F^{(1,1)} = \{f_1^{(1,1)}, f_2^{(1,1)}, f_3^{(1,1)}\}$: trois flux locaux au bus CAN 1,
- $F^{(2,2)} = \{f_1^{(2,2)}, f_2^{(2,2)}, f_3^{(2,2)}\}$: trois flux locaux au bus CAN 2,
- $F^{(3,3)} = \{f_1^{(3,3)}, f_2^{(3,3)}, f_3^{(3,3)}\}$: trois flux locaux au bus CAN 3,
- $F^{(1,2)} = \{f_1^{(1,2)}, f_2^{(1,2)}, f_3^{(1,2)}\}$: trois flux distants du bus CAN 1 vers le bus CAN 2,
- $F^{(1,3)} = \{f_1^{(1,3)}, f_2^{(1,3)}, f_3^{(1,3)}\}$: trois flux distants du bus CAN 1 vers le bus CAN 3.

Dans les différents exemples, nous considérons pour simplifier que le délai de traitement dans les passerelles est nul. La transmission d'une trame sur un réseau Wi-Fi est illustrée par la figure 4.2.

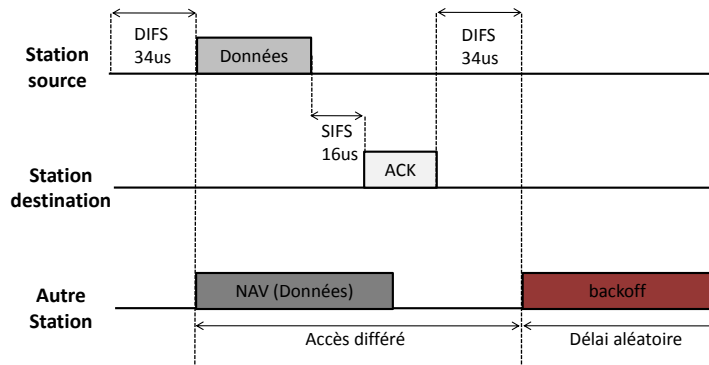


FIGURE 4.2 – Transmission d'une trame sur WI-FI

4.2.1.1 Stratégie de passerelle basique (un pour un)

Stratégie de passerelle un pour un:

La figure 4.3, illustre un impact possible de stratégie de passerelle *un pour un* qui consiste en

4. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU SANS-FIL

l'encapsulation de chaque trame CAN distante dans une trame Wi-Fi propre.

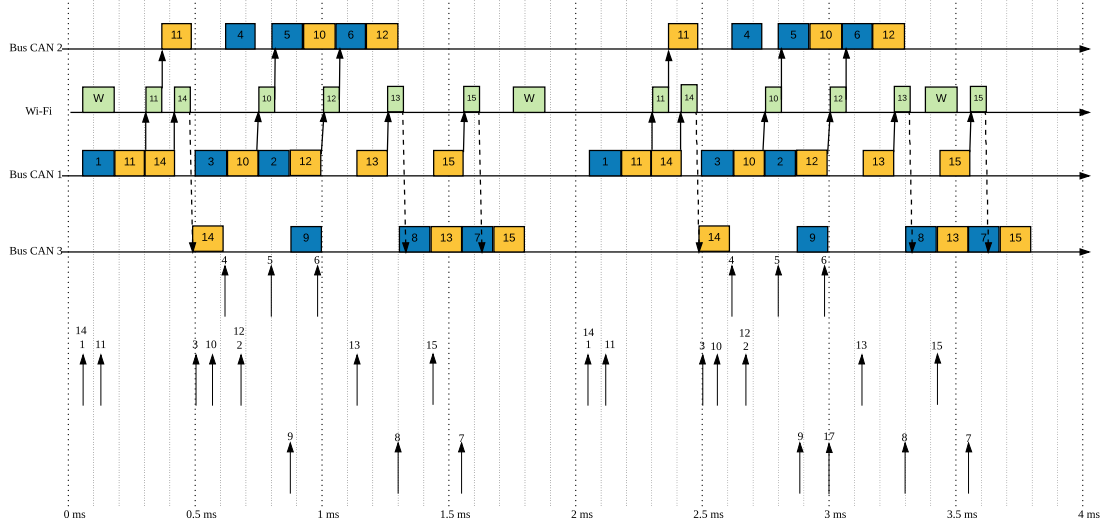


FIGURE 4.3 – Scénario avec une trame WI-FI pour une trame CAN

- La première trame d'un flux distant est générée à $t = 0.115$ ms, elle appartient au flux numéro 11 ($f_2^{(1,2)}$). Cette trame est transmise sur le bus après la trame du flux numéro 1 ($f_1^{(1,1)}$). Elle est reçue par la passerelle *Gw1* à l'instant $t = 0.3$ ms.

La stratégie de passerelle mise en œuvre, consistant en l'encapsulation d'une trame CAN dans une trame Wi-Fi, et le support sans fil étant libre, la trame du flux ($f_2^{(1,2)}$) est transmise après un délai DIFS d'écoute du support sans fil. Elle est reçue par la passerelle *Gw2* à $t = 0.362$ ms. À cet instant, la trame est dés-encapsulée et directement transmise sur le bus. Elle arrive à destination à l'instant $t = 0.487$ ms.

- La deuxième trame d'un flux distant transmise sur le bus CAN 1 appartient au flux numéro 14 ($f_2^{(1,3)}$). Elle a été générée à $t = 0.05$ ms. Cette trame étant la moins prioritaire elle attend la fin de transmission des trames numéro 1 et 11. Elle est transmise sur le bus à $t = 0.3$ ms et arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 0.425$ ms.

Après une durée DIFS d'écoute du support sans fil, cette dernière est transmise et arrive à la passerelle *Gw3* à $t = 0.487$. Elle est ensuite dés-encapsulée puis immédiatement transmise sur le bus, pour arriver à destination à l'instant 0.612.

Les autres trames de cet exemple sont transmises selon le même schéma. Sur ce scénario particulier, l'ordonnancement des trames est construit de telle sorte que les trames des flux distants accèdent directement au support sans fil. Les différentes trames best effort transmises sur le réseau Wi-Fi n'occasionnent aucune collision ni de délais d'attente.

4.2. ILLUSTRATION DE L'IMPACT DE WI-FI SUR LES STRATÉGIES DE PASSERELLE

Stratégie de passerelle un pour un: illustration du backoff

La figure 4.4 reprend la même stratégie de passerelle que précédemment tout en illustrant le mécanisme d'évitement de collision implémenté par Wi-Fi (algorithme du backoff).

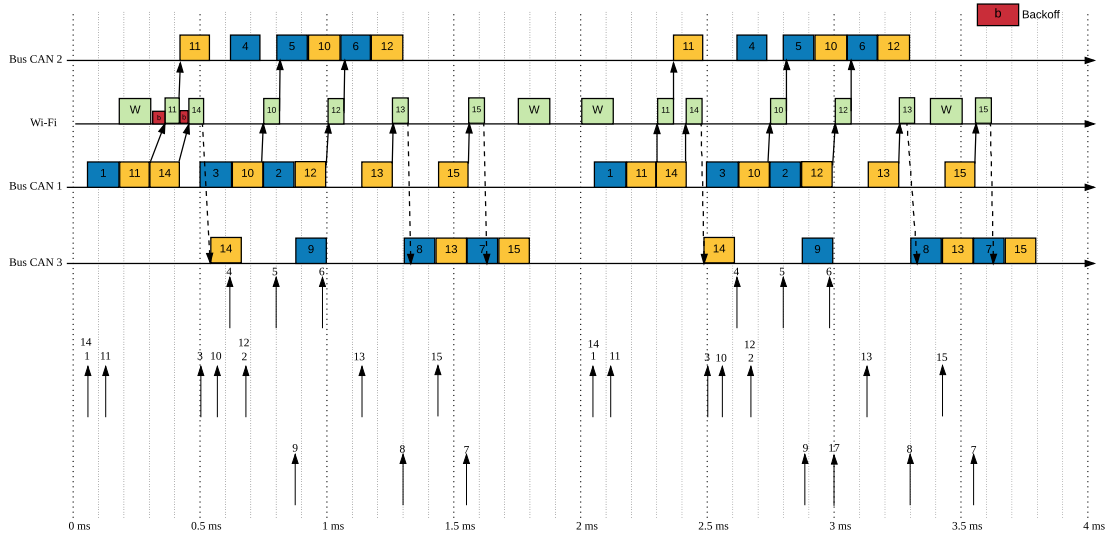


FIGURE 4.4 – Scénario avec une trame Wi-Fi pour une trame CAN; illustration de l'algorithme du backoff

- La première trame d'un flux distant générée appartient au flux numéro 11. Cette trame est générée sur le bus CAN 1 à $t = 0.115$.

Le bus CAN étant occupé, la trame est transmise à $t = 0.175ms$ et arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 0.3ms$. À cet instant, le support sans fil est occupé par la transmission d'une trame Wi-Fi best effort. Un délai d'attente aléatoire $b = 0.027ms$ correspondant à trois timeslot est généré par la passerelle $Gw1$.

À la fin de la transmission de la trame Wi-Fi ($t = 0.317ms$) et après une durée DIFS d'écoute du support sans fil, le délai d'attente est décrémenté. Dès la fin de ce délai (à $t = 0.378ms$), la trame est immédiatement transmise sur le support sans fil et arrive à la passerelle $Gw2$ à $t = 0.406ms$.

Le bus CAN 2 étant libre, la trame est transmise et arrive à destination à l'instant $t = 0.531ms$.

- La deuxième trame distante générée est une trame appartenant au flux $f_2^{(1,3)}$ (numéro 14). Cette trame est générée à $t = 0.05ms$, elle est moins prioritaire que les trames des flux numéro 1 et 11. Elle accède au bus à $t = 0.3ms$, arrive à la passerelle à $t = 0.425ms$, et par la suite, encapsulée dans une trame Wi-Fi.

La transmission de la trame numéro 11 sur le support sans fil n'étant toujours pas ter-

4. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU SANS-FIL

minée, un délai d'attente aléatoire $b = 0.018ms$ correspondant à deux timeslot est généré par la passerelle $Gw1$. Ce délai d'attente est décrémenté à partir de l'instant $t = 0.446ms$ correspondant à la libération du support sans fil. La trame est transmise à $t = 0.498ms$. Elle est reçue par la passerelle $Gw2$ à $t = 0.526ms$ puis est dés-encapsulée et directement transmise sur le bus de destination. La trame du flux $f_2^{(1,3)}$ arrive à destination à l'instant $t = 0.651ms$.

Les autres trames distantes de ce scénario sont transmises de manière classique (sans utilisation de l'algorithme du backoff et sans l'occurrence de collisions).

Stratégie de passerelle un pour un: illustration d'une collision

La figure 4.5 considère la même stratégie de passerelle que précédemment tout en illustrant le mécanisme de retransmission après l'occurrence d'une collision sur le support sans fil.

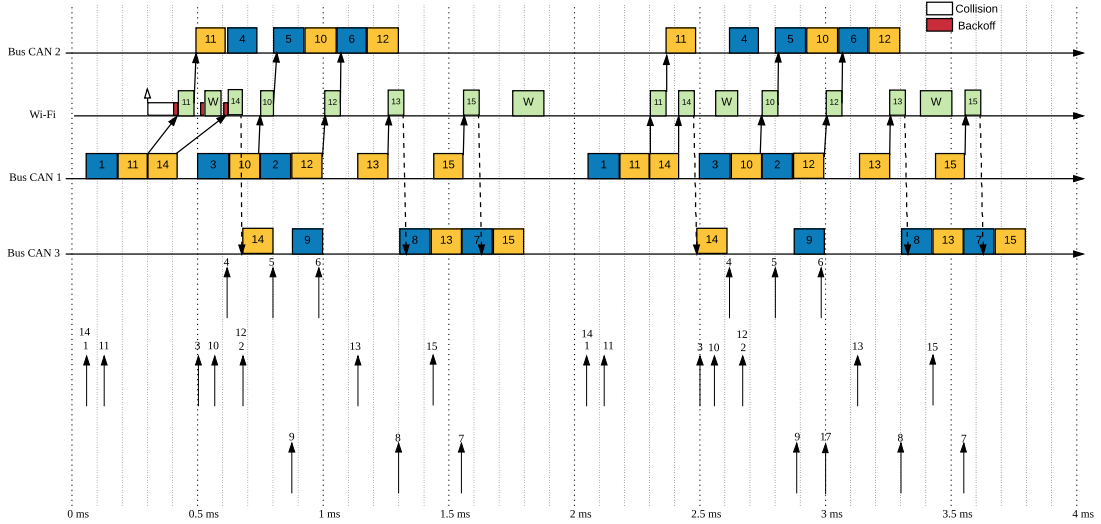


FIGURE 4.5 – Scénario avec une trame Wi-Fi pour une trame CAN; illustration d'une collision

- La première trame de flux distant est générée à $t = 0.115ms$, elle appartient au flux numéro 11. La trame est transmise sur le bus à l'instant $t = 0.175ms$, arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 0.3$. Elle est encapsulée par la passerelle dans une trame Wi-Fi. Par la suite, la passerelle écoute le support sans fil pendant une durée DIFS. Le support sans fil étant libre, la trame est immédiatement transmise et provoque une collision avec une trame Wi-Fi best effort qui a été transmise au même instant. À $t = 0.411ms$ correspondant à l'expiration du temporisateur (ACKtimeout), la passerelle n'a toujours pas reçu de trame ACK. La procédure de retransmission est alors initiée. La

4.2. ILLUSTRATION DE L'IMPACT DE WI-FI SUR LES STRATÉGIES DE PASSERELLE

passerelle *Gw1* et le nœud réseau ayant transmis la trame best effort génèrent respectivement des délais d'attente aléatoires correspondant à $0.009ms$ (1 timeslot) et $0.018ms$ (2 timeslot).

À $t = 0.42ms$ le temps d'attente de la trame du flux numéro 11 est expiré, elle est donc prête à être retransmise. Cette trame est alors transmise après un délai DIFS d'écoute du support sans fil. La trame arrive à la passerelle *Gw2* à $t = 0.482ms$. Durant cet intervalle de transmission le nœud ayant transmis la trame best effort suspend la décrémentation du délai d'attente associé à la trame Wi-Fi. La trame du flux numéro 11 est dés-encapsulée puis directement transmise sur le bus où elle arrive à sa destination à l'instant $t = 0.602ms$.

- La décrémentation du délai d'attente de la trame best effort est reprise à l'instant $t = 0.522$ correspondant à la libération du support sans fil.

À $t = 0.531ms$, le nœud sans fil écoute le support pendant une durée DIFS puis transmet la trame Wi-Fi à l'instant $t = 0.565ms$. Elle arrive à destination à $t = 0.593ms$.

- Une trame du flux $f_2^{(1,3)}$ (numéro 14) est générée à l'instant $t = 0.05ms$ mais n'est transmise sur le bus qu'à la fin des transmissions des trames des flux 1 et 11 à $t = 0.3ms$. Cette trame arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 0.425ms$.

Le support WI-FI étant occupé, un délai d'attente $b = 0.027ms$ (trois timeslots) est généré.

À l'instant $t = 0.522ms$, la passerelle effectue une écoute du support d'une durée DIFS puis décrémente le délai d'attente d'un timeslot. À l'instant $t = 0.565ms$, le support sans fil est occupé par la transmission de la trame best effort. La décrémentation du délai d'attente est alors suspendue jusqu'à la libération du support à $t = 0.633ms$. La décrémentation est reprise puis se termine à $t = 0.651ms$, la trame est directement transmise et arrive à la passerelle *Gw2* à $t = 0.679ms$. Le bus étant libre, la trame arrive à destination à l'instant $t = 0.804ms$.

Dans la suite de ce scénario, les autres trames distantes ainsi que les trames Wi-Fi best effort générées ne causeront aucune collision.

Comme montré au chapitre précédent, l'aspect positif de la stratégie d'encapsulation basique (un pour un) est qu'elle limite le délai d'attente au niveau de la passerelle d'entrée. À l'inverse, ce type de stratégie génère un nombre important de trames transmises sur le réseau sans fil. Cela peut induire des délais de transmission plus longs sur le réseau fédérateur (notamment à cause des collisions). Au chapitre précédent, nous avons montré qu'un moyen pour réduire le nombre de trames transmises sur le réseau fédérateur est de regrouper les trames CAN avant de les transmettre sur ce même réseau. Dans les paragraphes qui suivent, nous illustrons ces stratégies groupées.

Nous prenons en compte uniquement l'ordonnancement présentant une collision.

4.2.1.2 Stratégies de passerelle groupées

Stratégie de passerelle deux pour un

Dans l'exemple suivant, nous considérons une stratégie de passerelle permettant l'encapsulation de deux trames CAN dans une trame Wi-Fi. La figure 4.6 explicite l'impact de cette nouvelle stratégie sur le réseau Wi-Fi.

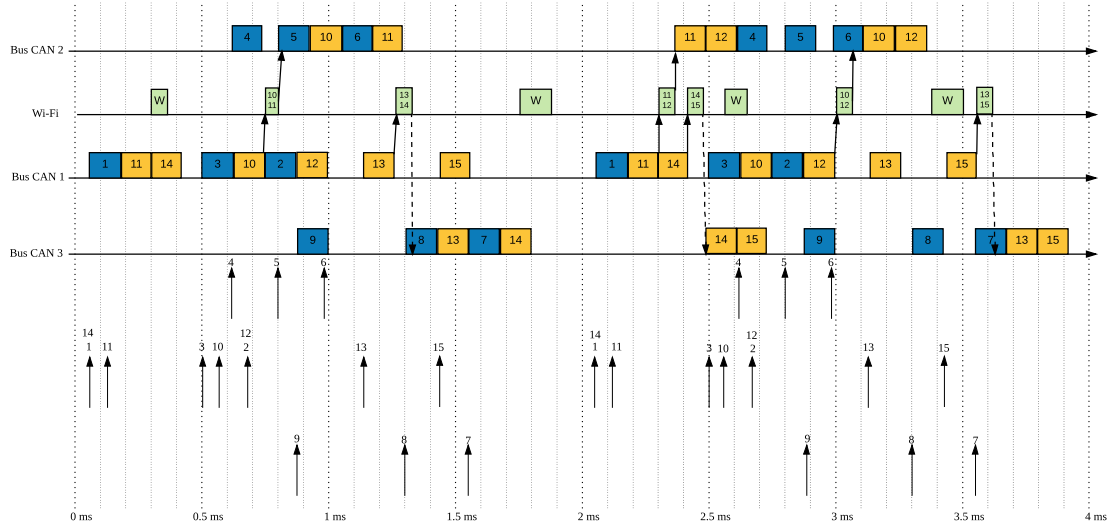


FIGURE 4.6 – Scénario considérant une stratégie de passerelle deux pour un

- La première trame du flux numéro 11 ($f_1^{(1,2)}$) est générée à l'instant $t = 0.115ms$ sur le bus CAN 1.
Elle est transmise sur le bus à $t = 0.175ms$ et arrive à la passerelle à $t = 0.3$. En considérant la nouvelle stratégie de passerelle, la trame doit attendre l'arrivée d'une autre trame ayant le même bus de destination.
- Une trame du flux numéro 14 ($f_2^{(1,3)}$) est générée à $t = 0.05ms$. Étant la trame la moins prioritaire, elle est retardée par les trames des flux numéros 1 et 11. Elle est transmise sur le bus à l'instant $t = 0.3ms$, puis arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 0.425ms$.
Les trames des flux numéro 11 et 14 n'ayant pas la même destination, elles doivent attendre l'arrivée d'autres trames ayant une même destination avant leur transmission.
- Une trame du flux numéro 10 commence sa transmission sur le bus 1 à l'instant $t = 0.625ms$. La trame arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 0.75ms$.
La trame du flux numéro 11 étant déjà en attente, les trames des flux 10 et 11 sont encapsulées dans une trame Wi-Fi et transmises après une durée DIFS d'écoute du support. Les trames arrivent à la passerelle $Gw2$ à $t = 0.816ms$, elles sont dés-encapsulées puis transmises sur le bus 2.

4.2. ILLUSTRATION DE L'IMPACT DE WI-FI SUR LES STRATÉGIES DE PASSERELLE

Les trames des flux numéro 10 et 11 arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.05ms$ et $t = 1.3ms$.

- Une trame du flux numéro 12 commence à être transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 0.875$. Cette trame arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1ms$. Comme aucune trame à destination du bus CAN 2 n'est en attente de transmission, la trame du flux numéro 12 est mise en attente.
- Une trame du flux numéro 13 commence sa transmission sur le bus 1 à l'instant $t = 1.265ms$. Elle arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1.265ms$ où une trame du flux numéro 14 attend d'être transmise. Les trames sont alors encapsulées puis transmises sur le support sans fil. Les trames des flux 13 et 14 arrivent à destination aux instants $t = 1.55ms$ et $t = 1.8ms$.

L'ordonnancement des autres trames transmises dans cet exemple reproduit le même schéma de transmission que celui présenté.

Stratégie de passerelle trois pour un

L'exemple suivant, prend en considération une stratégie de passerelle permettant l'encapsulation de trois trames CAN dans une trame Wi-Fi. La figure 4.7 illustre l'impact de cette stratégie de passerelle sur le réseau sans fil.

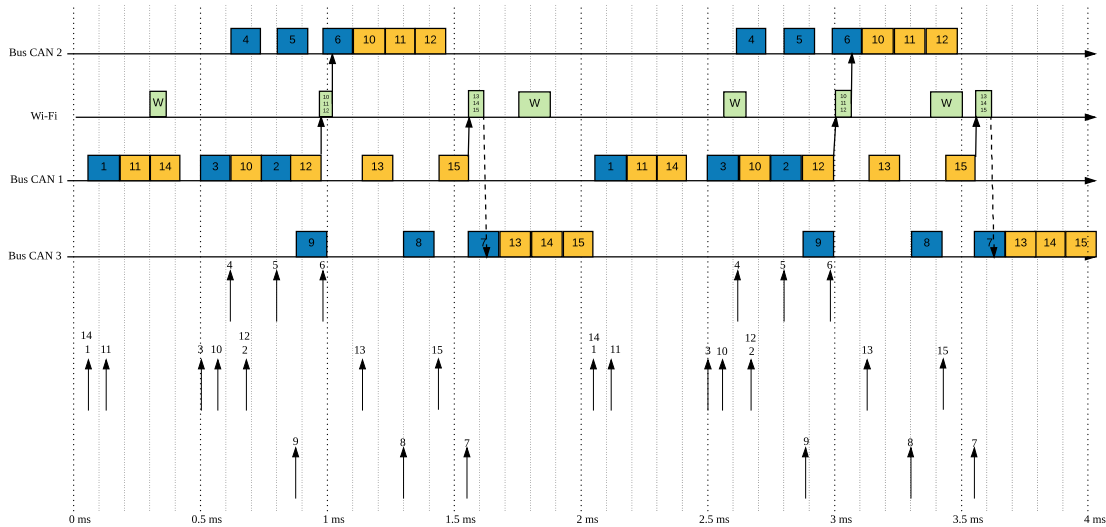


FIGURE 4.7 – Scénario avec trois trames WI-FI pour une trame CAN; illustration d'une stratégie de passerelle trois pour un

Sur ce scénario:

- Les trames des flux numéros 10, 11 et 12 sont générées respectivement sur le bus CAN 1 aux instants $t = 0.175ms$, $t = 0.625ms$ et $t = 0.875$. Ces trames arrivent à la passerelle

$Gw1$ respectivement aux instants $t = 0.3$, $t = 0.75ms$ et $t = 1ms$. Les trames 10, 11 et 12 ayant la même destination, elles sont encapsulées dans une trame Wi-Fi qui est transmise après une durée DIFS d'écoute du support sans fil. Elles arrivent à la passerelle $Gw2$ à $t = 1.07ms$ puis sont transmises sur le bus. Les trames des flux 10, 11 et 12 arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.225ms$, $t = 1.35ms$ et $t = 1.475ms$.

- Les trames des flux numéros 13, 14 et 15 reproduisent le même schéma de transmission que les trames 10, 11 et 12. Elles arrivent à la passerelle $Gw1$ aux instants $t = 0.425ms$, $t = 1.265ms$ et $t = 1.565ms$. Les trames sont encapsulées dans une trame WI-FI qui est transmise sur le support sans fil. Elles arrivent à la passerelle de destination ($Gw3$) à $t = 1.635ms$. Les trames des flux 13, 14 et 15 arrivent au bus CAN 3 respectivement aux instants $t = 1.8ms$, $t = 1.925ms$ et $t = 2.05ms$.

Les autres trames transmises dans ce scénario suivent le même schéma de groupage de trames. Des deux scénarios précédents, nous remarquons que la collision sur le support sans fil ne se produit plus. En effet, la stratégie de passerelle groupée, en introduisant un délai au niveau de la passerelle, permet d'éviter cette collision. Cela s'explique par le fait que la trame du flux $f_1^{(1,2)}$ (numéro 11) n'est plus transmise au même instant que la trame Wi-Fi générée par un nœud sans fil. Il est à noter qu'une collision peut potentiellement se produire si une trame Wi-Fi best effort est transmise au même instant que les trames groupées (par exemple aux instants $t = 1ms$ et $1.565ms$ de ce dernier scénario).

De plus, les stratégies de passerelle *deux pour un* et *trois pour un* permettent de réduire le nombre de trames transmises sur le réseau sans fil. Par conséquent, elles permettent de réduire le nombre de collisions sur le réseau. Cependant, ces stratégies introduisent un délai non maîtrisé au niveau des passerelles. La stratégie temporisée présentée au chapitre précédent permet d'obtenir cette maîtrise. Elle est illustrée dans les paragraphes suivants.

4.2.1.3 Stratégies de passerelle Temporisées

Stratégie de passerelle deux pour un: Temporisation de 0.6ms

Cet exemple prend en considération une stratégie de passerelle permettant l'encapsulation de deux trames CAN dans une trame WI-FI et implémentant un temporisateur de passerelle d'une durée de $0.6ms$.

La figure 4.8 illustre l'impact de cette stratégie sur le support sans fil.

- La première trame appartenant au flux numéros 11 ($f_1^{(1,2)}$) est transmise sur le bus CAN 1 à l'instant $t = 0.175ms$. Elle arrive à la passerelle $Gw1$ à l'instant $t = 0.3$.
En considérant la stratégie de passerelle *deux pour un* avec un temporisateur, la trame doit attendre l'arrivée d'une autre trame ayant le même bus de destination ou alors un délai maximum d'attente de $0.6ms$. Ainsi, elle sera transmise au maximum à l'instant $0.9ms$.
- Une trame du flux numéro 14 est transmise sur le bus à l'instant $t = 0.3ms$, puis arrive à

4.2. ILLUSTRATION DE L'IMPACT DE WI-FI SUR LES STRATÉGIES DE PASSERELLE

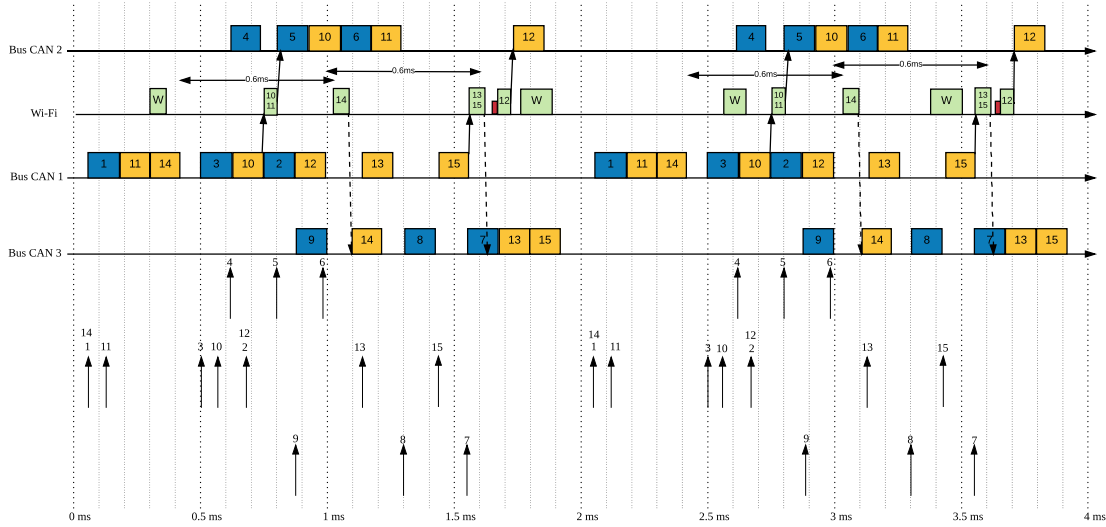


FIGURE 4.8 – Scénario avec deux trames CAN pour une trame Wifi; Temporisation de 0,6ms

la passerelle *Gw1* à l'instant $t = 0.425ms$. Cette trame n'ayant pas la même destination que la trame du flux 11, elle doit attendre elle-aussi une autre trame. Elle est transmise au maximum à l'instant $1.025ms$.

- Une trame du flux numéro 10 est transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 0.625ms$. Elle arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 0.75ms$. La trame du flux numéro 11 est déjà en attente. Les trames des flux 10 et 11 sont alors encapsulées et transmises sur le support sans fil. Ces trames arrivent à la passerelle *Gw2* à $t = 0.816ms$. Leur transmission sur le bus est retardée par une trame d'un flux local. Les trames des flux numéro 10 et 11 arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.05ms$ et $t = 1.3ms$.
- La trame du flux numéro 12 est transmise sur le bus CAN 1 à l'instant $t = 0.875$. Elle arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1ms$. Étant donné qu'aucune trame n'est en attente de transmission au niveau des passerelles, la trame doit attendre l'arrivée d'une autre trame ou alors l'expiration d'un temporisateur à $t = 1.6ms$.
- Une trame du flux numéro 13 est transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 1.14ms$, elle arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1.265ms$. À cet instant, aucune trame n'est en attente de transmission, une temporisation de $0.6ms$ est alors initiée.

La trame du flux numéro 15 est transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 1.44ms$, puis arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1.565ms$. La trame du flux 13 étant déjà en attente de transmission vers le bus CAN 2, les trames sont encapsulées puis transmises sur le support sans fil. Elles arrivent à la passerelle *Gw3* à l'instant $t = 1.631ms$ où elles sont dés-encapsulées et transmises sur le bus. Les trames des flux 13 et 15 arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.8ms$ et $t = 1.925ms$.

4. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU SANS-FIL

- Le temporisateur de la trame du flux 12 expire à l'instant $t = 1.6ms$, le support sans fil étant occupé, un backoff correspondant à $0.018ms$ (deux timeslot) est généré. La trame CAN est encapsulée dans une trame Wi-Fi puis transmise sur le support sans fil. La trame arrive à la passerelle *Gw2* à l'instant $t = 1.751ms$ où elle est dés-encapsulée puis transmise sur le bus CAN. Elle arrive à destination à $t = 1.876ms$.

Le même schéma de transmission est appliqué aux autres trames de cet exemple.

Stratégie de passerelle trois pour un: Temporisation de 1ms

L'exemple de la figure 4.9 prend en considération une stratégie de passerelle permettant l'encapsulation de trois trames CAN dans une trame WI-FI tout en implémentant un temporisateur de $1ms$.

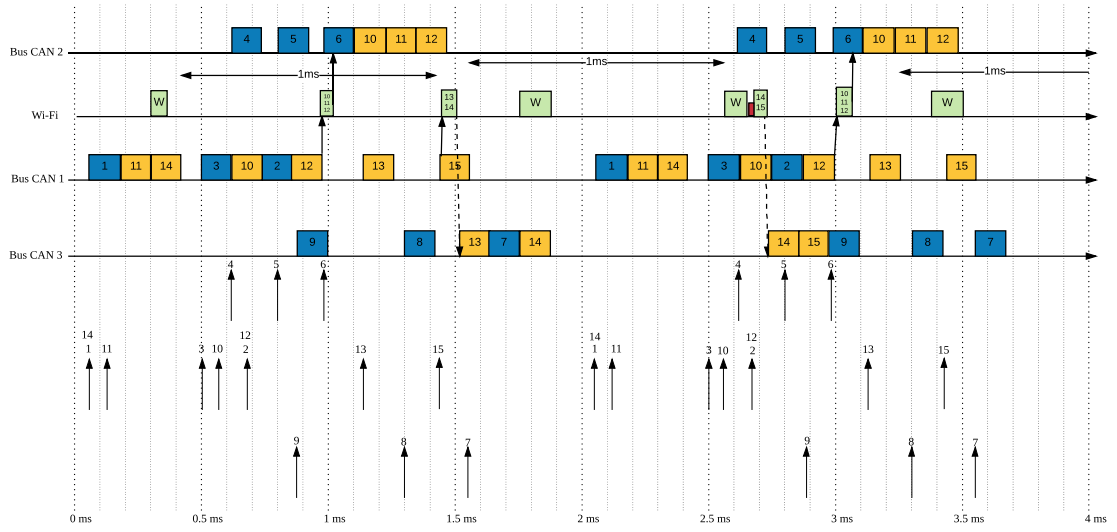


FIGURE 4.9 – Scénario avec trois trames CAN pour une trame WI-FI; Temporisation de 1ms

4.2. ILLUSTRATION DE L'IMPACT DE WI-FI SUR LES STRATÉGIES DE PASSERELLE

- Les trames des flux numéros 10, 11 et 12 sont générées respectivement sur le bus CAN 1 aux instants $t = 0.175ms$, $t = 0.625ms$ et $t = 0.875$. Ces trames arrivent à la passerelle $Gw1$ respectivement aux instants $t = 0.3$, $t = 0.75ms$ et $t = 1ms$. Les trames 10, 11 et 12 ayant la même destination, elles sont encapsulées dans une trame Wi-Fi qui est transmise après une durée DIFS d'écoute du support sans fil. Lors de cette transmission le temporisateur de passerelle n'a aucun effet (trois trames arrivent à $Gw1$ avant l'expiration du temporisateur). Les trames arrivent à la passerelle $Gw2$ à $t = 1.07ms$ puis sont transmises sur le bus. Les trames des flux 10, 11 et 12 arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.225ms$, $t = 1.35ms$ et $t = 1.475ms$.
- Une trame du flux numéro 14 est générée à $t = 0.05ms$. Elle est transmise sur le bus à l'instant $t = 0.3ms$, puis arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 0.425ms$. Cette trame doit attendre l'arrivée de deux autres trames ou l'expiration de son temporisateur à l'instant $t = 1.425ms$.
- Une trame du flux numéro 13 est transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 1.14ms$. Elle arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 1.265ms$ où une trame du flux numéro 14 attend d'être transmise. Les trames des flux 13 et 14 doivent attendre l'arrivée d'une autre trame ayant la même destination. Le temporisateur de la trame du flux 14 expire à l'instant $t = 1.425ms$ avant l'arrivée d'une nouvelle trame, les trames des flux numéros 13 et 14 sont encapsulées dans une trame Wi-Fi qui est transmise sur le support sans fil. À $t = 1.491ms$ les trames arrivent à la passerelle $Gw3$, elles sont dés-encapsulées puis transmises sur le bus CAN 3. Les trames des flux 13 et 14 arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.616ms$ et $t = 1.866ms$.

Les autres trames de ce scénario sont transmises suivant le même schéma de groupage de trames. Des deux exemples précédents, nous remarquons, que les stratégies de passerelle temporisées permettent elles-aussi d'éviter l'occurrence de la collision tout en apportant plus de flexibilité. En effet, une trame CAN peut être transmise seule ou accompagnée d'une ou de deux autres trames dans une trame Wi-Fi (selon la durée du temporisateur).

Les différentes stratégies de passerelle précédemment introduites peuvent être alors caractérisées par les paramètres suivants :

- Le nombre maximum $N_{l,m}$ de trames CAN qui peuvent être encapsulées par une passerelle Gw_l dans une trame Wi-Fi.
- Le délai maximum d'attente W_{maxj} d'une trame de chaque flux distant fH_j dans sa passerelle source.

Ainsi, suivant l'évolution de ces paramètres nous obtenons :

- Une stratégie de passerelle basique lorsque : $N_{l,m} = 1$ pour toutes les paires de passerelles

où $W_{max_j} = 0$ pour tous les flux CAN distants.

- Une stratégie de passerelle groupée lorsque : au moins une paire $N_{l,m}$ est supérieure à 1 et W_{max_j} est supérieur à l'échéance du flux correspondant.
- Une stratégie de passerelle temporisée dans les autres cas.

Le délai des flux sur un réseau Wi-Fi étant sensible aux collisions et aux tirages aléatoires de back-off, l'application des différentes stratégies de passerelle groupées aide à minimiser le nombre de trames sur le réseau fédérateur et de ce fait minimiser le nombre de collisions. De plus, l'introduction d'un temporisateur à ces stratégies permet de réduire le temps d'attente des trames au niveau d'une passerelle. Il est nécessaire de trouver un compromis permettant d'avoir un temps d'attente borné minimal au niveau de la passerelle tout en minimisant le nombre de trames sur le réseau sans fil.

Dans ce qui suit, nous présentons une étude permettant de mieux appréhender ce compromis. Cette étude de cas prend en compte les différentes stratégies de passerelles prises en compte et porte sur l'interconnexion de bus CAN distants via un réseau Wi-Fi implémentant une méthode d'accès *DCF*.

Cette étude de cas propose une analyse quantitative des stratégies de passerelle proposées dans la section 4.2.1. Cette analyse se base sur des simulations. Les stratégies de passerelle présentées (basique, groupée et temporisée) sont évaluées et deux configurations réseau distinctes sont prises en considération :

- Une configuration où la charge des flux réseaux est faible.
- Une configuration où la charge des flux réseaux est plus importante.

4.3 Une architecture réseau faiblement chargée

L'architecture réseau présentée par la Figure 4.10 interconnecte trois bus distants CAN. Quatre nœuds incluant une passerelle sont connectés à chaque bus (e.g. NC_4, NC_5, NC_6, Gw_2 pour le bus CAN 2).

Le réseau local sans fil interconnectant les différents bus distants est un réseau Wi-Fi qui suit le standard IEEE802.11g [36]. Chaque bus est connecté au réseau Wi-Fi par une passerelle. De plus, nous considérons que trois nœuds sans fil locaux $NW_1...NW_3$ sont connectés au réseau Wi-Fi et tous les émetteurs sans fil ($GW_1, NW_1, \dots$) sont connectés en mode ad hoc (il n'y a pas de point d'accès).

Les tableaux suivants 4.1, 4.2 et 4.3 présentent la configuration de l'ensemble des flux qui sont transmis sur cette architecture réseau. Ainsi, trois flux CAN locaux (un par bus CAN), quatre flux CAN distants et trois flux Wi-Fi locaux sont considérés.

4.3. UNE ARCHITECTURE RÉSEAU FAIBLEMENT CHARGÉE

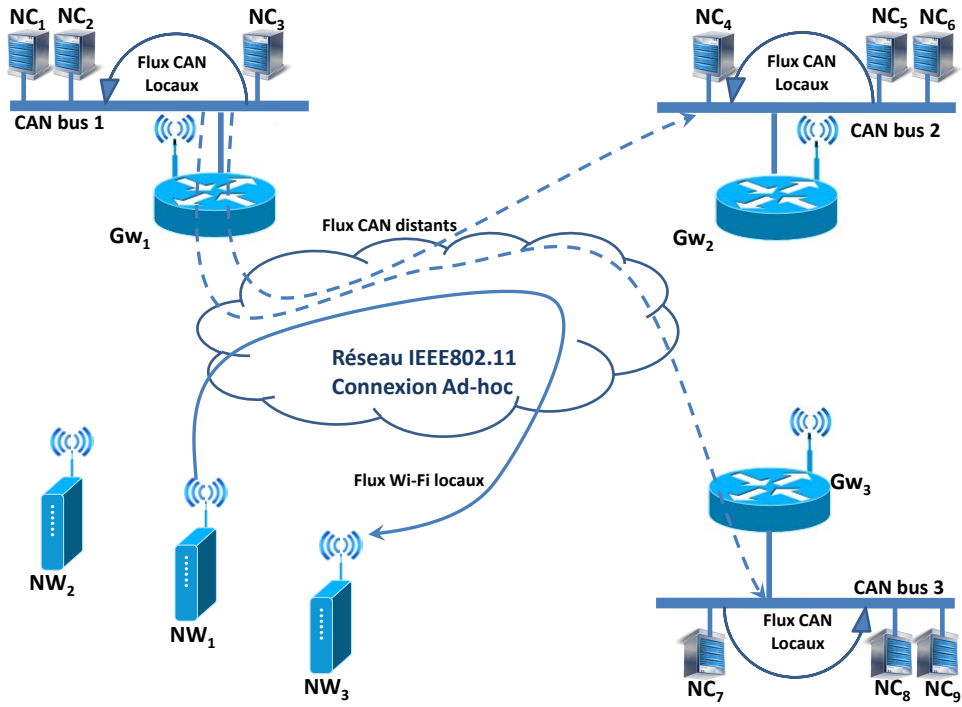


FIGURE 4.10 – Une architecture réseau faiblement chargée

Les quatre flux CAN distants sont générés par des stations du bus CAN 1. Trois d'entre eux (fH_1, fH_2 et fH_3) ont pour destination des nœuds du bus CAN 2, alors que le dernier flux (fH_4) a pour destination le bus 3. Sur la figure 4.10, les flux CAN distants sont représentés en pointillés tandis que les autres flux sont représentés avec des lignes pleines.

	IdC_i	$srcC_i$	$destC_i$	$PC_i(ms)$	$DC_i(ms)$	$SC_i(octets)$
fC_1	10	NC_1	NC_2	4	4	8
fC_2	11	NC_5	NC_6	4	4	8
fC_3	12	NC_7	NC_9	4	4	8

TABEAU 4.1 – Configuration des flux CAN locaux

4. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU SANS-FIL

	IdH_i	$srcH_i$	$destH_i$	$PH_i(ms)$	$DH_i(ms)$	$SH_i(octets)$
fH_1	1	NC_1	NC_4, NC_6	8	8	8
fH_2	2	NC_2	NC_5, NC_6	8	8	8
fH_3	3	NC_3	NC_4	8	8	8
fH_4	4	NC_3	NC_7, NC_8	8	8	8

TABLEAU 4.2 – Configuration des flux CAN distants

	$srcW_i$	$destW_i$	$PW_i(ms)$	$SW_i(octets)$
fW_1	NW_1	NW_3	2	200
fW_2	NW_2	NW_3	2	200
fW_3	NW_3	NW_1	2	8

TABLEAU 4.3 – Configuration des flux IEEE 802.11 locaux

B	Basique	
G1	Groupé	$N_{1,2} = 2$ $N_{l,m} = 1 \forall (l, m) \neq (1, 2)$
G2	Groupé	$N_{1,2} = 3$ $N_{l,m} = 1 \forall (l, m) \neq (1, 2)$
T1	Temporisé	$W_{max_j} = 1ms \forall j$
T2	Temporisé	$W_{max_j} = 2ms \forall j$
T3	Temporisé	$W_{max_j} = 3ms \forall j$
T4	Temporisé	$W_{max_j} = 4ms \forall j$

TABLEAU 4.4 – Stratégies simulées

4.3.1 Analyse de performance des stratégies de passerelle

Les caractéristiques des stratégies de passerelles évaluées sont présentées par le tableau 4.4.

Dans un premier temps, nous nous intéressons au pourcentage de trames CAN locales et distantes qui dépassent leurs échéances:

Quelles que soient les stratégies de passerelle considérées, les trames CAN locales ne dépassent jamais leurs échéances.

Similairement, lors de l'utilisation des stratégies de passerelles basiques et temporisées, les trames CAN distantes ne dépassent pas leurs échéances. Cependant, lorsqu'une stratégie de passerelle groupée est considérée, quelques flux CAN distants dépassent leurs échéances (0,2% pour la passerelle G1 et 0,5% pour la passerelle G2).

4.3. UNE ARCHITECTURE RÉSEAU FAIBLEMENT CHARGÉE

La configuration générale étant faiblement chargée l'obtention de ces résultats n'est pas surprenante. Le dépassement d'échéance pour un flux CAN local étant impossible, ce problème se pose uniquement pour les flux CAN distants. Le délai de transmission de ces flux inclut le temps d'attente à la passerelle source, le délai de transmission sur le réseau Wi-Fi (ce délai a peu de chances d'être élevé, car le réseau sans fil est faiblement chargé) et le temps d'attente à la passerelle de destination (le temps de dés-encapsulation est relativement réduit).

Le dépassement d'une échéance se produit uniquement si le délai d'attente à la passerelle source est élevé. Ceci arrive souvent dans le cas de l'utilisation d'une stratégie de passerelle groupée. Ce résultat est similaire à celui du regroupement (paragraphe 4.2.1.2). Ce résultat confirme l'inconvénient de l'utilisation de la stratégie de passerelle groupée. Aussi, la stratégie de passerelle groupée ne doit pas être prise en considération.

De plus, les flux locaux au réseau sans fil étant générés suivant une loi de poisson, le nombre moyen de trames est constant.

Le nombre de trames sans fil générées par des trames CAN distantes quand à lui dépend de la stratégie d'encapsulation utilisée.

Le Tableau 4.5 compare le nombre de trames sans fil d'un flux CAN distant au nombre de trames d'un flux sans fil local (e.x. fW_1).

Pour la stratégie basique, les deux nombres se trouvent être égaux en raison de la configuration des périodes des flux CAN distants. Une diminution de ce ratio est logique car il est en stricte corrélation avec l'augmentation du délai maximum des trames dans la passerelle.

	B	T1	T2	T3	T4
$\sum \frac{fh_j}{fW_1}$	1	0.88	0.77	0.7	0.53

TABLEAU 4.5 – Charge des flux CAN distants

Le Tableau 4.6 donne le pourcentage de collisions pour chacune des stratégies de passerelles considérées. Ce pourcentage est relativement faible (0,4%). En outre, il diminue lorsque la valeur du délai maximum autorisé au niveau de la passerelle augmente (le nombre global de trames sans fil diminue). Ce résultat est une conséquence de la faible charge du réseau sans fil.

	B	T1	T2	T3	T4
%col	0.375	0.358	0.343	0.335	0.328

TABLEAU 4.6 – Collisions sans fil

4. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU SANS-FIL

Le Tableau 4.7 indique le délai moyen des flux sans fil locaux. Ce délai décroît lorsque la valeur de temporisation de la passerelle augmente. Ce résultat est une conséquence de la réduction du nombre de trames sans fil.

	B	T1	T2	T3	T4
Délai(μs)	135	133	131.7	130.9	129.6

TABLEAU 4.7 – Délais moyens des flux sans fil locaux

Les résultats obtenus confirment l'analyse qualitative des stratégies de passerelles (paragraphe 4.2.1). Cependant, la configuration de flux utilisée précédemment est trop faiblement chargée pour une analyse quantitative significative des différentes stratégies de passerelle. Une analyse plus poussée est conduite dans la section suivante.

4.4 Une architecture réseau plus chargée

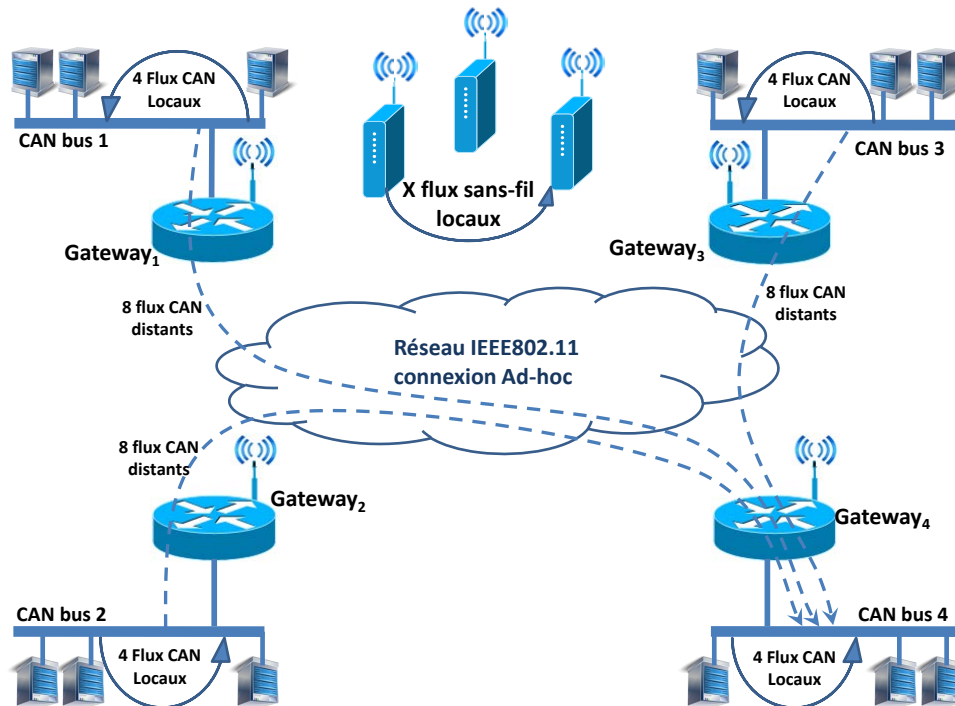


FIGURE 4.11 – Une architecture réseau fortement chargée

4.4. UNE ARCHITECTURE RÉSEAU PLUS CHARGÉE

La Figure 4.11 présente l'architecture réseau utilisée pour la suite de nos expérimentations. Cette architecture inclut quatre bus CAN. Les bus CAN 1, 2 et 3 sont la source de 8 flux CAN distants chacun, et le bus 4 est la destination de tous ces flux distants.

Le Tableau 4.8 résume les caractéristiques des flux CAN distants. Par souci de simplicité, seuls les bus source et destination sont donnés (les nœuds sont omis).

	IdH_i	Bus	$PH_i(ms)$	$DH_i(ms)$	$SH_i(octets)$
fH_1	11	$1 \rightarrow 4$	10	10	8
fH_2	12	$1 \rightarrow 4$	10	10	6
fH_3	13	$1 \rightarrow 4$	10	10	4
fH_4	14	$1 \rightarrow 4$	10	10	2
fH_5	15	$1 \rightarrow 4$	10	10	8
fH_6	16	$1 \rightarrow 4$	10	10	6
fH_7	17	$1 \rightarrow 4$	10	10	4
fH_8	18	$1 \rightarrow 4$	10	10	2
fH_9	31	$2 \rightarrow 4$	10	10	8
fH_{10}	32	$2 \rightarrow 4$	10	10	6
fH_{11}	33	$2 \rightarrow 4$	10	10	4
fH_{12}	34	$2 \rightarrow 4$	10	10	2
fH_{13}	35	$2 \rightarrow 4$	10	10	8
fH_{14}	36	$2 \rightarrow 4$	10	10	6
fH_{15}	37	$2 \rightarrow 4$	10	10	4
fH_{16}	38	$2 \rightarrow 4$	10	10	2
fH_{17}	51	$3 \rightarrow 4$	10	10	8
fH_{18}	52	$3 \rightarrow 4$	10	10	6
fH_{19}	53	$3 \rightarrow 4$	10	10	4
fH_{20}	54	$3 \rightarrow 4$	10	10	2
fH_{21}	55	$3 \rightarrow 4$	10	10	8
fH_{22}	56	$3 \rightarrow 4$	10	10	6
fH_{23}	57	$3 \rightarrow 4$	10	10	4
fH_{24}	58	$3 \rightarrow 4$	10	10	2

TABLEAU 4.8 – Flux CAN distants

Quatre flux CAN locaux sont transmis sur chacun des bus 1, 2, 3 et 4. Le tableau 4.9 résume les caractéristiques des flux CAN locaux.

L'étude est conduite avec différents nombres de flux Wi-Fi locaux identiques (entre 1 et 7 flux) ayant pour période $PW_i = 2$ et une taille $SW_i = 200$.

Nous avons conduit trois ensembles d'expérimentation en considérant:

1. La stratégie d'encapsulation basique.
2. La stratégie d'encapsulation temporisée; tous les flux CAN distants ont le même temps d'attente au niveau de la passerelle.

4. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU SANS-FIL

	IdC_i	Bus	$PC_i(ms)$	$DC_i(ms)$	$SC_i(octets)$
fC_1	1	4	2	2	8
fC_2	2	4	2	2	6
fC_3	3	4	2	2	4
fC_4	4	4	2	2	2
fC_5	21	1	1	1	8
fC_6	22	1	1	1	6
fC_7	23	1	1	1	4
fC_8	24	1	1	1	2
fC_9	41	2	1	1	8
fC_{10}	42	2	1	1	6
fC_{11}	43	2	1	1	4
fC_{12}	44	2	1	1	2
fC_{13}	61	3	1	1	8
fC_{14}	62	3	1	1	6
fC_{15}	63	3	1	1	4
fC_{16}	64	3	1	1	2

TABLEAU 4.9 – Flux CAN locaux

3. La stratégie d'encapsulation temporisée où chaque flux CAN distant a un temps d'attente maximum dédié au niveau de la passerelle $W_{max_j} = (4,1 - (j \times 0,1))ms$.

B	Basique	
T1	Timed	$W_{max_j} = 1ms \forall j$
T2	Timed	$W_{max_j} = 2ms \forall j$
T3	Timed	$W_{max_j} = 3ms \forall j$
T4	Timed	$W_{max_j} = 4ms \forall j$
T5	Timed	$W_{max_j} = (4,1 - (j \times 0,1))ms$

TABLEAU 4.10 – Stratégies simulées

Le Tableau 4.10 résume les caractéristiques des différentes stratégies de passerelles simulées.

4.4.1 Analyse de performance des stratégies de passerelle

Les tableaux 4.11, 4.12, 4.13 et 4.14 présentent les différents résultats obtenus sur le réseau sans fil.

Le tableau 4.11 présente le nombre relatif de trames Wi-Fi générées par les flux CAN distants. La valeur la plus importante de trames Wi-fi générées est obtenue lors de l'utilisation de la stratégie d'encapsulation basique. Nous remarquons que le nombre de trames Wi-Fi diminue lorsque la valeur de la temporisation au niveau de la passerelle augmente. En effet, le nombre moyen de trames CAN distantes encapsulées dans une trame Wi-Fi augmente dès que la valeur du temporisateur augmente.

4.4. UNE ARCHITECTURE RÉSEAU PLUS CHARGÉE

	B	T1	T2	T3	T4	T5
$\sum \frac{fH_j}{fW_1}$	4.8	2.8	1.9	1.4	1.2	1.6

TABLEAU 4.11 – Nombre relatif de trames Wi-Fi générées par les flux CAN distants

Les tableaux 4.12 et 4.13 présentent le pourcentage de collisions obtenu sur le réseau sans fil ainsi que les délais moyens des flux Wi-Fi locaux pour chacune des stratégies de passerelle et pour chaque scénario simulé (nombre de flux sans fil). Les cases vides du tableau indiquent que le réseau sans fil est surchargé et que les délais de transmission divergent.

Nous remarquons à partir des différents tableaux que le pourcentage des collisions ainsi que les délais moyens des flux sont profondément liés au nombre de trames Wi-Fi en compétition.

Étant donné que des valeurs de temporisateur élevées diminuent le nombre de trames sur le réseau, une baisse du pourcentage d'occurrence de collisions est observée. De plus, cette diminution du nombre de trames permet d'obtenir des délais moins longs sur le réseau sans fil. Cependant, plus les valeurs des temporisateurs augmentent, plus le temps d'attente des trames CAN distantes dans la passerelle augmente. Cela signifie qu'un compromis doit être trouvé entre le délai d'attente dans la passerelle et le délai sur le réseau sans fil.

	B	T1	T2	T3	T4	T5
1 fW	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
2 fW	0.9	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3
3 fW	1.4	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5
4 fW	2.2	1.0	0.8	0.8	0.7	0.8
5 fW		1.6	1.3	1.2	1.1	1.2
6 fW		2.5	2.0	1.8	1.6	1.8
7 fW				2.7	2.5	2.8

TABLEAU 4.12 – Pourcentage des collisions sur le réseau sans-fil

	B	T1	T2	T3	T4	T5
1 fW	148	122	114	111	109	112
2 fW	172	138	129	124	122	125
3 fW	204	158	147	141	138	142
4 fW	250	185	169	162	158	163
5 fW		221	199	189	184	192
6 fW		279	242	227	220	231
7 fW				287	274	294

TABLEAU 4.13 – Délais moyens des flux Wi-Fi locaux

4. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU SANS-FIL

Le tableau 4.14 nous permet de mieux appréhender ce compromis. Il présente le taux de trames CAN distantes qui dépassent leurs échéances. Chaque valeur du tableau 4.14 correspond au nombre moyen de trames CAN distantes qui dépassent leurs échéances lorsque 10^6 de ces trames sont générées et transmises. Ces taux de dépassement d'échéance sont compatibles avec la transmission de données temps réel molles.

De ces simulations, sur l'exemple considéré, il est clair que la stratégie temporisée est meilleure que la stratégie basique. En effet, la stratégie basique ne peut être utilisée lorsque le réseau doit transmettre plus de quatre flux Wi-Fi locaux (le système ne converge plus). La stratégie temporisée quant à elle fonctionne toujours lorsque six ou sept flux Wi-Fi locaux sont transmis. Ces résultats sont compatibles avec la transmission de données temps réel molles. De plus, la valeur du temporisateur a un impact certain sur le nombre d'échéances dépassées. Dans la configuration présentée précédemment, la meilleure valeur de temporisation à utiliser est de $3ms$ pour tous les flux CAN distants (moins de la moitié de leur période).

Il est à noter que la stratégie T5 donne un nombre légèrement plus important d'échéance dépassée. L'idée derrière l'utilisation de cette stratégie est de limiter le temps d'attente dans la passerelle pour les flux CAN distants avec les priorités les plus faibles car ces flux peuvent expérimenter des délais importants sur les bus CAN. Les résultats de cette stratégie ne sont pas convaincants.

Dans le cas général, le choix de la temporisation doit prendre en compte la distribution de délais sur le réseau sans fil ainsi que la distribution de délais sur les bus CAN. Ces distributions doivent être combinées de sorte que la distribution globale des délais des flux en excluant le temps d'attente au niveau des passerelles puisse être obtenue. Un temps d'attente maximum à la passerelle peut être déduit à partir de cette distribution. Le calcul d'une telle distribution reste encore un problème ouvert.

	B	T1	T2	T3	T4	T5
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
5		0	0	0	3	2
6		97	21	19	20	22
7				200	200	257

TABLEAU 4.14 – Échéances dépassées des flux CAN distants

Cette étude de cas a porté sur l'étude de l'extension des bus CAN via des réseaux sans fil pour l'échange de données temps réel à contraintes molles. Les bus CAN sont interconnectés

via un réseau sans fil IEEE802.11g standard utilisant CSMA/CA pour le contrôle d'accès au médium réseau en mode ad hoc. L'interconnexion entre CAN et le réseau sans fil a été effectuée en utilisant des passerelles.

Les stratégies implémentées par ces passerelles sont un point-clé dans ce type d'architecture. Nous avons montré sur un réseau faiblement chargé puis sur un réseau plus chargé que la meilleure stratégie de passerelle consiste en l'encapsulation d'un groupe de trames CAN dans chaque trame Wi-Fi tout en bornant le temps d'attente de chacune des trames CAN dans sa passerelle d'entrée. Avec une telle stratégie, le nombre d'échéances dépassées peut-être maintenu à un niveau faible, à condition que le canal sans fil soit fiable (nous prenons en compte uniquement les collisions).

4.5 Conclusion

La flexibilité des connexions sans fil est attrayante dans le contexte des réseaux hétérogènes embarqués. Cette étude a porté sur l'utilisation de protocoles sans fil pour l'interconnexion de bus spécifiques distants. L'objectif visé est d'analyser les questions de faisabilité et de conception inhérentes à ce type d'architecture de réseau hétérogène. Nous nous sommes focalisés sur la détermination des stratégies de passerelles appropriées pour une topologie réseau composée de bus CAN distants interconnectés les uns aux autres par un réseau local sans fil suivant le protocole IEEE802.11g.

En utilisant cette architecture simple et de faible coût, nous montrons dans cette étude qu'en exploitant intelligemment les fonctionnalités de CAN et de Wi-Fi pour les politiques d'interconnexion employées, les échéances dépassées de trames peuvent être limitées pour les trames CAN transmises sur le réseau sans fil. D'autre part, l'utilisation d'une stratégie de passerelles permettant l'encapsulation d'un groupe de trames CAN dans chaque trame Wi-Fi tout en bornant le temps d'attente de chaque trame CAN permet de réduire les collisions. Ce constat rejoint les conclusions présentées sur les réseaux Ethernet[49]. Ainsi, pour les réseaux de types Wi-Fi et Ethernet s'appuyant sur CSMA, l'utilisation de stratégies de passerelles est incontournable. Dans le chapitre suivant, nous évaluons l'impact de différentes stratégies de passerelles sur des réseaux Ethernet commutés full duplex (sans collision) pour transmettre des flux temps réel à contraintes fortes. L'objectif de ces travaux est de montrer l'impact des différentes stratégies de passerelles d'entrées sur les délais de bout en bout des flux ainsi que sur les performances globales des réseaux Ethernet commutés considérés.

5 Interconnexion par un réseau Ethernet commuté

5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons traité de l'impact de l'utilisation de stratégies de passerelles d'entrées sur des réseaux sans fil implémentant un mécanisme CSMA/CA pour l'accès au médium. Nous avons montré que l'utilisation d'une stratégie de passerelle d'entrée regroupant plusieurs trames CAN dans une trame Wi-Fi a un impact positif sur l'utilisation du réseau et cela même si un délai d'attente supplémentaire est introduit pour les trames CAN au niveau de la passerelle. En effet, l'étude menée, nous a permis de constater que grouper des trames permet de réduire le trafic sur le réseau sans fil, ce qui a pour conséquence de réduire le taux de collision et d'améliorer l'utilisation de la bande passante totale. Ce constat fait des réseaux Wi-Fi de bons candidats pour la transmission de flux réseaux à contraintes molles.

Dans ce chapitre, nous évaluons l'impact de ces mêmes stratégies sur des réseaux Ethernet commutés pour la transmission de flux temps réel à contraintes fortes. L'objectif de ces travaux est de monter l'impact des différentes stratégies de passerelles d'entrées sur les délais de bout en bout des flux ainsi que sur les performances globales des réseaux Ethernet considérés.

Nous prenons en compte deux types de commutateurs distincts [AVB](#) et PQSE (Priority Queuing Switched Ethernet: Chaque port de sortie implémente une politique de service de type priorité stricte). Cela nous permet donc d'étudier deux cas différents i.e le cas d'un réseau Ethernet commuté PQSE implémentant plusieurs niveaux de priorités ainsi que le cas d'un réseau Ethernet AVB implémentant un *credit based shaper* pour la transmission des flux.

Pour cette étude de cas, nous étudions en outre la stratégie de la passerelle de sortie. Nous mesurons l'impact d'une régulation des flux par la passerelle de sortie sur le délai de bout en bout moyen. Une telle stratégie simplifie la prédictibilité des bus CAN de destination.

5.2 Vue d'ensemble de l'architecture réseau

La Figure [5.1](#) décrit l'architecture réseau considérée dans cette étude. Cette architecture est composée d'un ensemble de bus CAN interconnectés par un réseau fédérateur Ethernet.

5. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU ETHERNET COMMUTÉ

Cette interconnexion est effectuée via des passerelles qui implémentent différentes stratégies d'encapsulation de trames CAN dans les trames Ethernet.

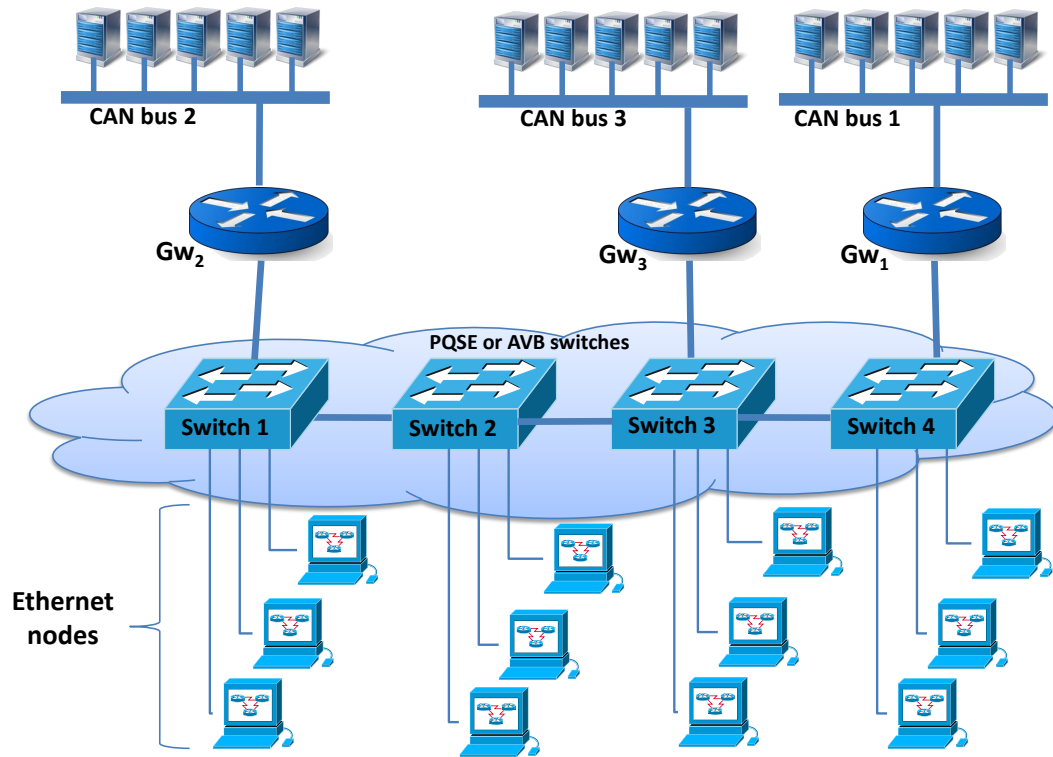


FIGURE 5.1 – Architecture réseau CAN-Ethernet (AVB/PQSE)

Afin d'évaluer l'impact des différentes stratégies de passerelles sur différents types de réseaux Ethernet commuté, nous avons considéré, au niveau du réseau fédérateur, deux types de commutateurs qui n'ont pas le même mode de fonctionnement:

- Des commutateurs Ethernet qui implémentent un algorithme d'ordonnancement à priorité fixe PQSE (Priority Queuing Switched Ethernet) au niveau des files d'attente.
- Des commutateurs Ethernet AVB (Audio Video Bridging) qui implémentent un mix entre un algorithme de lissage de trafic basé sur une notion de crédit et une priorisation des files d'attente. Ce mécanisme de lissage est décrit à la section [2.3.4.2](#).

De plus, nous considérons que plusieurs nœuds Ethernet sont connectés au réseau fédérateur. L'architecture réseau présentée par la Figure 5.1 étant hétérogène, trois types de flux distincts sont transmis; 1) des flux CAN locaux, 2) des flux CAN distants, 3) des flux Ethernet best effort. La Figure 5.2 récapitule les étapes de transmission des trames des flux CAN distants.

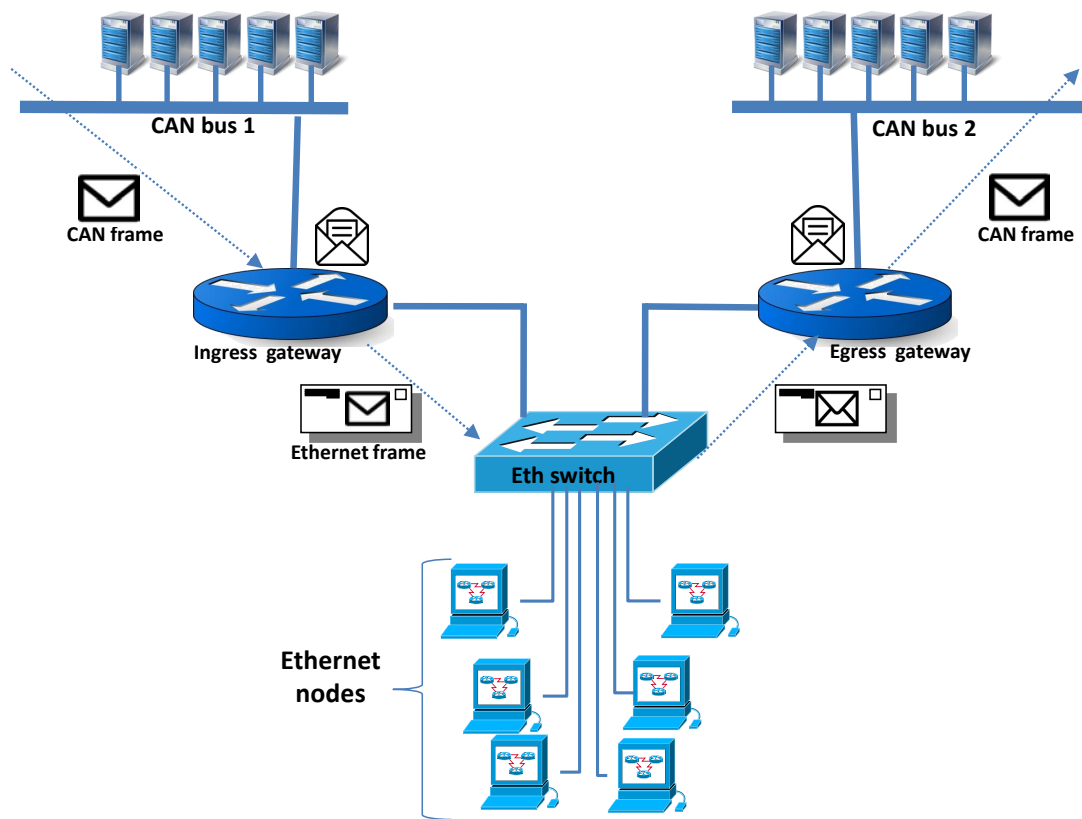


FIGURE 5.2 – Processus de transmission des trames CAN distantes

Différentes stratégies d'encapsulation peuvent être considérées au niveau de la passerelle d'entrée. Ces stratégies peuvent impacter directement le délai des trames CAN distantes. De plus, les délais de ces trames ainsi que celui des trames Ethernet sur le réseau fédérateur dépendent de la politique d'ordonnancement implémentée au niveau des ports de sortie des commutateurs. Ainsi, l'allocation des priorités influence directement le délai des flux.

Dans le cas d'un Ethernet PQSE, plus la file d'attente est prioritaire plus le délai d'attente des trames est à priori réduit. Pour Ethernet AVB, c'est le mécanisme d'allocation de crédit aux files d'attente SRA et SRB qui influence le délai des flux. En effet, une faible valeur de crédit pour une file d'attente conduit à une diminution de la capacité de transmission, ce qui a pour conséquence une augmentation du délai dans la file. À l'inverse, une haute valeur de crédit permet à une file d'attente de transmettre plus rapidement les trames. En résumé, le délai des différents flux du réseau est principalement impacté par :

- L'allocation des priorités sur les réseaux CAN et Ethernet commuté.
- Les stratégies de passerelles envisagées.
- La charge des ports de sortie des commutateurs qui est une conséquence du routage des flux.

5.3 Stratégies de passerelles d'entrées Ethernet

Afin d'illustrer les différentes stratégies de passerelle, nous considérons l'exemple présenté dans le chapitre trois (section 3.5). Nous réutilisons le même scénario arbitraire de génération des trames des différents flux. Dans cet exemple, nous avons pris pour hypothèse un délai fixe pour la transmission des trames entre deux passerelles. Dans ce qui suit, nous supposons que le réseau fédérateur considéré est un réseau Ethernet commuté. Ainsi, le délai de transmission d'une trame entre deux passerelles n'est plus un délai fixe mais un délai induit directement par le réseau Ethernet commuté.

Pour rappel, dans cet exemple, les flux locaux sont considérés comme les plus prioritaires sur chacun des bus. Comme dans les exemples précédents, nous considérons que le temps de transmission d'une trame d'un flux quelconque sur un bus CAN est de $125\mu s$. De plus, nous considérons que les flux distants traversent un seul commutateur et que différents flux Ethernet best effort sont transmis. Dans les différents exemples que nous présentons, nous considérons que les délais de traitement des passerelles ainsi que le délai de commutation sont nuls.

5.3.1 Stratégie de passerelle basique

La figure 5.3 illustre la stratégie basique d'encapsulation consistant en l'encapsulation d'une trame CAN dans une trame Ethernet propre.

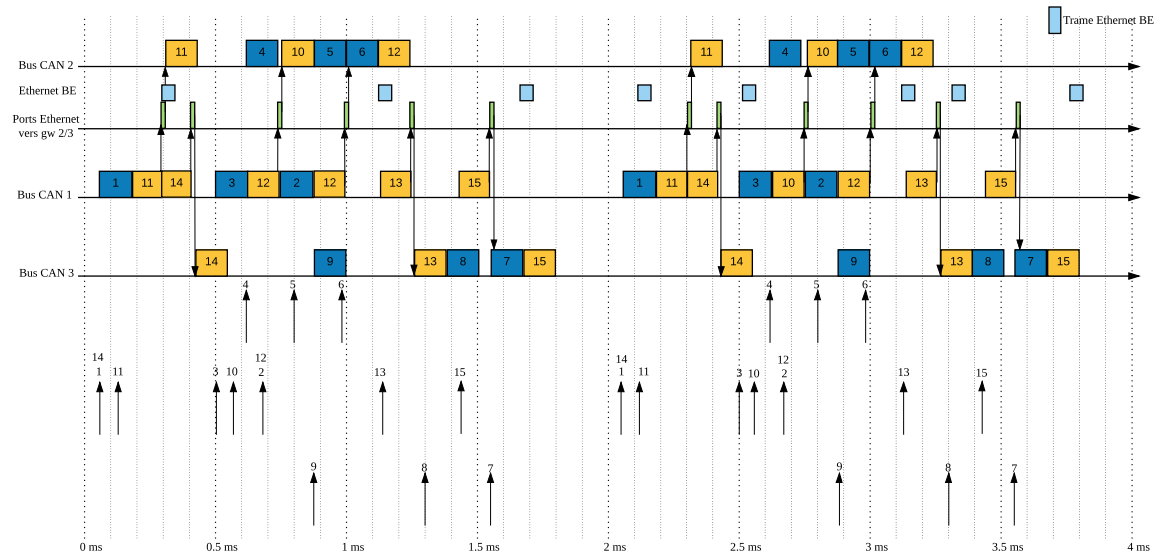


FIGURE 5.3 – Scénario avec une trame CAN pour une trame Ethernet

- La première trame d'un flux distant générée appartient au flux numéro 11 ($f_2^{(1,2)}$). Elle est générée à $t = 0.115ms$ mais n'est transmise sur le bus 1 qu'après la fin de la transmission

de la trame du flux 1 ($f_1^{(1,1)}$). La trame du flux numéro 11 est transmise sur le bus CAN à $t = 0.175ms$, elle est reçue par la passerelle *Gw1* à l'instant $t = 0.3ms$.

La trame du flux $f_2^{(1,2)}$ est transmise sur le réseau Ethernet puis reçue par la passerelle *Gw2* à $t = 0.30128ms$. À cet instant, la trame est dés-encapsulée puis directement transmise sur le bus. Elle arrive à destination à $t = 0.42628ms$. La trame du flux numéro 16 arrive à destination à $t = 0.55128ms$.

- La deuxième trame d'un flux distant transmise sur le bus CAN 1 appartient au flux numéro 14 ($f_2^{(1,3)}$). Elle a été générée à $t = 0.05ms$. Étant la trame la moins prioritaire, elle doit attendre la fin de transmission des trames numéro 1 et 11. La trame est transmise sur le bus à $t = 0.3ms$ puis arrive à la passerelle *Gw1* à l'instant $t = 0.425ms$. Cette trame est encapsulée dans une trame Ethernet puis directement transmise sur le réseau. Elle arrive à la passerelle *Gw3* à $t = 0.42628ms$. Elle est ensuite dés-encapsulée puis immédiatement transmise sur le bus. Elle arrive à destination à l'instant $0.55128ms$.

Les autres trames de cet exemple sont transmises selon le même schéma. Il est à noter que les trames Ethernet best effort transmises sur le réseau pendant la transmission des trames CAN n'entrent pas en concurrence avec ces dernières car le support de transmission n'est pas partagé (files d'attente différentes due à la commutation).

Cette stratégie de passerelle permet de transmettre les trames sur le réseau Ethernet commuté sans aucune attente au niveau de la passerelle. Cependant, elle génère un grand nombre de trames sur le réseau Ethernet. Il est possible de réduire le nombre de trames sur le réseau en utilisant une stratégie de passerelle par groupage de trames.

5.3.2 Stratégies de passerelle groupées

5.3.2.1 Stratégie de passerelle deux pour un

La figure 5.4, illustre l'impact d'une stratégie de passerelle qui encapsule deux trames CAN dans une trame Ethernet sur le réseau fédérateur.

- Une trame du flux distant numéros 11 ($f_1^{(1,2)}$) est générée sur le bus CAN 1 à l'instant $t = 0.115ms$. Elle est transmise sur le bus à $t = 0.175ms$. La trame arrive à la passerelle *Gw1* à l'instant $t = 0.3$. En considérant la nouvelle stratégie de passerelle, la trame doit attendre l'arrivée d'une autre trame ayant le même bus de destination.
- Une trame du flux $f_2^{(1,3)}$ (numéro 14) est générée à $t = 0.05ms$. Étant la trame la moins prioritaire, elle est retardée par les trames des flux numéros 1 et 11, elle est transmise sur le bus à l'instant $t = 0.3ms$, puis arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 0.425ms$. Les trames des flux numéro 11 et 14 n'ayant pas la même destination, elles doivent alors attendre l'arrivée d'autres trames ayant une même destination avant leur transmission.
- Une trame du flux numéro 10 commence sa transmission sur le bus 1 à l'instant $t = 0.625ms$ et arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 0.75ms$.

5. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU ETHERNET COMMUTÉ

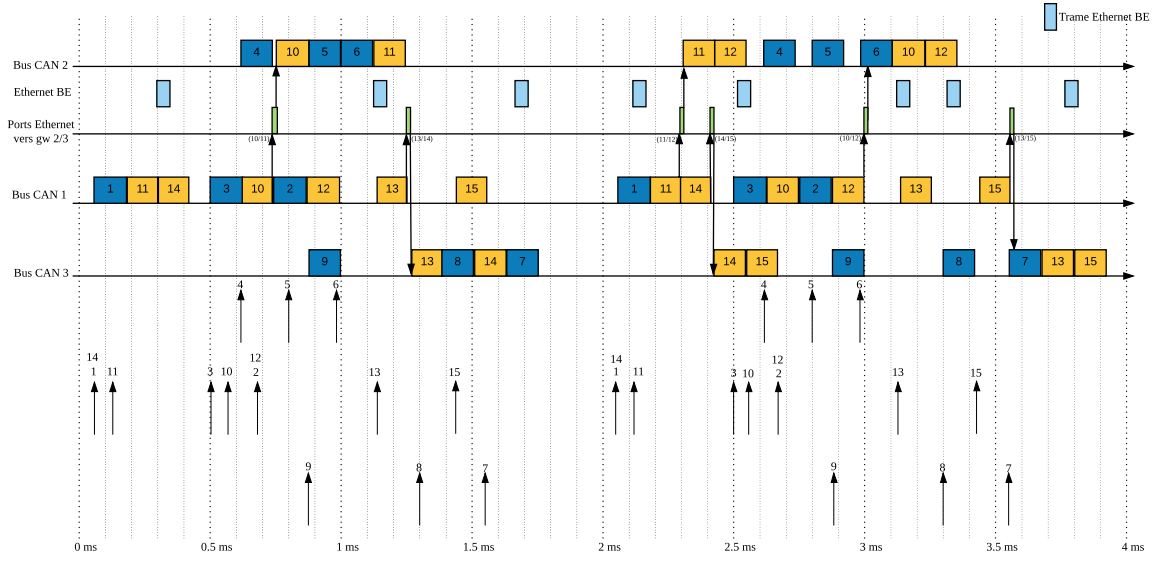


FIGURE 5.4 – Scénario avec deux trames CAN pour une trame Ethernet

La trame du flux numéro 11 étant déjà en attente, les trames des flux 10 et 11 sont encapsulées dans une trame Ethernet qui est transmise sur le réseau Ethernet commuté.

Les trames arrivent à la passerelle *Gw2* à $t = 0.75128ms$, elles sont dés-encapsulées puis transmises sur le bus 2. Les trames des flux numéro 10 et 11 arrivent à destination respectivement aux instants $t = 0.87628ms$ et $t = 1.25128ms$.

- Une trame du flux numéro 12 commence à être transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 0.875$ et arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1ms$. Comme aucune trame à destination du bus CAN 2 n'est en attente de transmission, la trame du flux numéro 12 est mise en attente.
- Une trame du flux numéro 13 commence sa transmission sur le bus 1 à l'instant $t = 1.14ms$ et arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1.265ms$ où une trame du flux numéro 14 est attendue de transmission. Les trames sont encapsulées dans une trame Ethernet qui est transmise sur le réseau Ethernet. La trame arrive à la passerelle destination à $t = 1.26628ms$. Les trames des flux 13 et 14 sont dés-encapsulées et arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.39128ms$ et $t = 1.64128ms$.

Le reste des trames de cet exemple reproduisent le même schéma de transmission.

5.3.2.2 Stratégie de passerelle trois pour un

La figure 5.5 met en exergue l'impact d'une stratégie de passerelle permettant l'encapsulation de trois trames CAN dans une trame Ethernet sur le réseau fédérateur.

- Une trame distante du flux $f_1^{(1,2)}$ (numéros 11) est générée puis transmise sur le bus à l'instant $t = 0.175ms$. La trame arrive à la passerelle *Gw1* à l'instant $t = 0.3$. En

5.3. STRATÉGIES DE PASSERELLES D'ENTRÉES ETHERNET

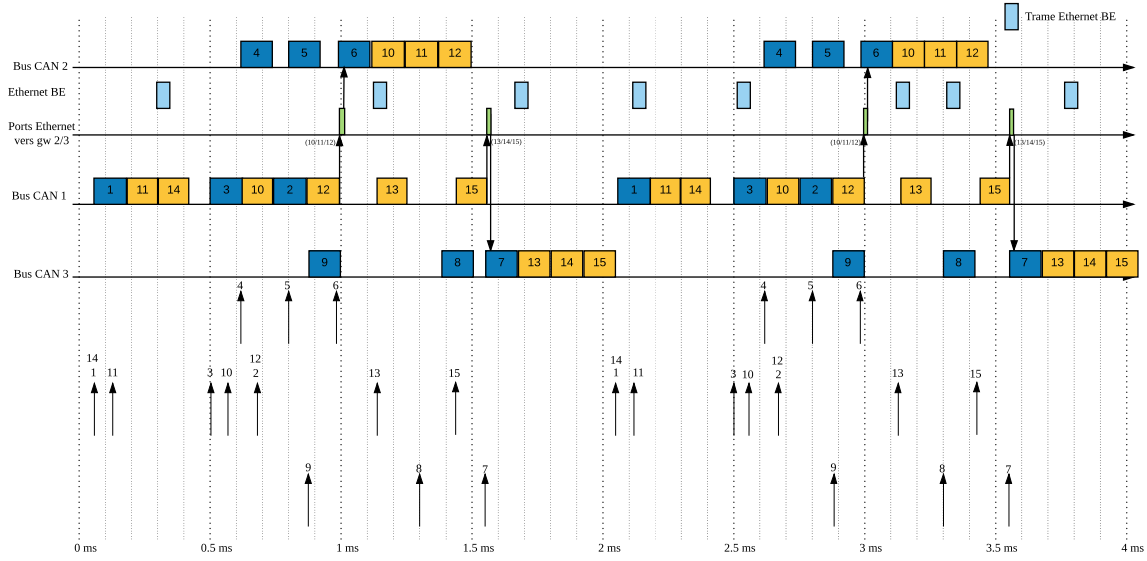


FIGURE 5.5 – Scénario avec trois trames CAN pour une trame Ethernet

considérant une stratégie de passerelle trois pour un, la trame doit attendre l'arrivée de deux autres trames ayant le même bus de destination.

- Une trame du flux $f_2^{(1,3)}$ (numéro 14) est transmise sur le bus à l'instant $t = 0.3ms$ et arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 0.425ms$. Cette trame n'ayant pas le même bus de destination que la trame du flux numéro 11, elle attend elle aussi deux autres trames.
- Une trame du flux numéro 10 commence sa transmission sur le bus 1 à l'instant $t = 0.625ms$ et arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 0.75ms$. Une instance de la trame du flux numéro 11 étant déjà en attente, en considérant une stratégie de passerelle encapsulant trois trames, les trames des flux 10 et 11 doivent attendre encore l'arrivée d'une dernière trame avant leur transmission.
- Une trame du flux numéro 12 commence à être transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 0.875$. Cette trame arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 1ms$. À cet instant, le nombre de trames à destination du bus CAN 2 est de trois. Les trames des flux 10, 11 et 12 sont encapsulées dans une trame Ethernet. Cette dernière est directement transmise sur le réseau Ethernet et arrive à la passerelle $Gw2$ à $t = 1.00136ms$.
Les trames des flux 10, 11 et 12 sont dés-encapsulées puis transmises sur le bus 2. Elles arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.23068ms$, $t = 1.35568ms$ et $t = 1.48068ms$.
- Une trame du flux numéro 13 commence sa transmission sur le bus 1 à l'instant $t = 1.14ms$ et arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 1.265ms$ où la trame du flux numéro 14 attend d'être transmise. Les trames des flux 13 et 14 doivent attendre l'arrivée d'une dernière trame ayant la même destination.

5. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU ETHERNET COMMUTÉ

- Une trame du flux numéro 15 est générée et transmise sur le bus CAN 1 à $t = 1.44ms$. Elle arrive à la passerelle *Gw1* à l'instant $t = 1.565ms$. Le nombre de trames à destination du bus CAN 2 étant de trois, les trames sont encapsulées dans une trame Ethernet qui est transmise sur le réseau fédérateur. Cette dernière arrive à la passerelle de destination à $t = 1.56636ms$. Les trames des flux 13, 14 et 15 arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.80068ms$, $t = 1.92568ms$ et $t = 2.05068ms$.

Les autres trames transmises dans cet exemple suivent le même schéma de groupage de trames. Les trames best effort transmises sur cet exemple n'ont pas d'incidence sur la transmission des flux distants [CAN](#). Des deux exemples précédemment présentés, nous remarquons que les stratégies d'encapsulation *deux pour un* et *trois pour un* introduisent au niveau des passerelles un délai non négligeable.

L'introduction d'un temporisateur permet de limiter le temps d'attente maximal d'une trame au niveau de la passerelle.

5.3.3 Stratégies de passerelle temporisées

5.3.3.1 Stratégie de passerelle deux pour un; Temporisation de 0.5ms

La figure 5.6 illustre l'impact d'une stratégie de passerelle permettant l'encapsulation de deux trames CAN dans une trame Ethernet et implémentant un temporisateur sur le réseau fédérateur. Le temporisateur permet de fixer l'attente maximum d'une trame au niveau de la passerelle à $0.5ms$.

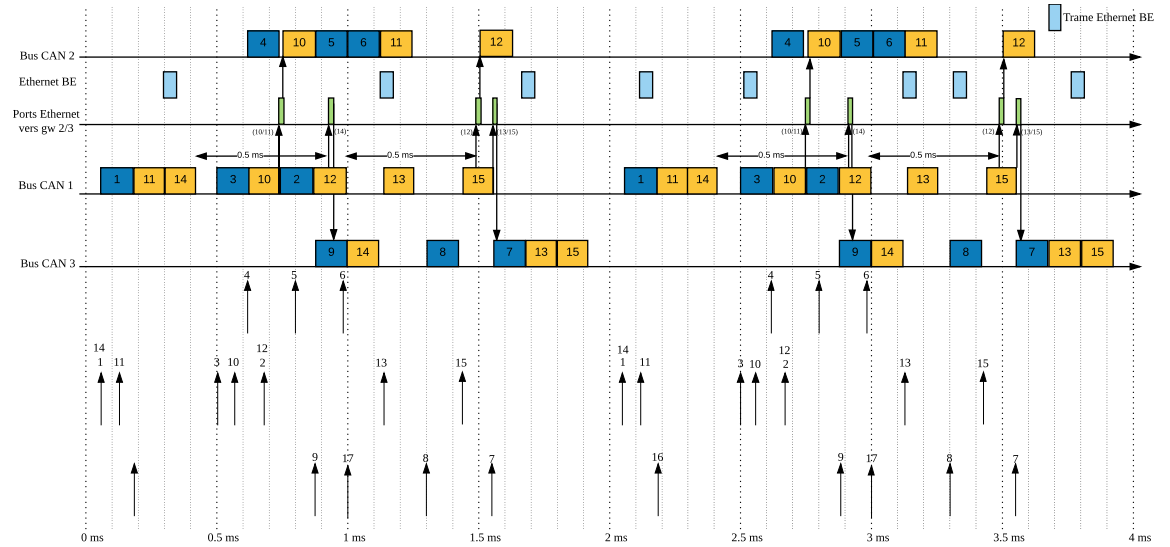


FIGURE 5.6 – Scénario avec deux trames CAN pour une trame Ethernet; Temporisation de 0.5ms

- Une trame appartenant au flux numéro 11 ($f_1^{(1,2)}$) est transmise sur les bus CAN 1 à l'instant $t = 0.175ms$. Elle arrive à la passerelle *Gw1* à l'instant $t = 0.3$. En considérant la stratégie de passerelle deux pour un temporisée, la trame doit attendre l'arrivée d'une autre trame ayant le même bus de destination ou alors l'expiration du délai d'attente de $0.5ms$. Ainsi, la trame sera transmise au maximum à l'instant $0.8ms$.
- Une trame du flux numéro 14 est transmise sur le bus à l'instant $t = 0.3ms$. Elle arrive à la passerelle *Gw1* à l'instant $t = 0.425ms$. Cette trame n'ayant pas la même destination que la trame du flux 11, elle doit attendre elle aussi une autre trame. Elle sera transmise au maximum à l'instant $0.925ms$.
- Une trame du flux numéro 10 est transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 0.625ms$. Elle arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 0.75ms$. La trame du flux numéro 11 est déjà en attente, les trames des flux 10 et 11 sont alors encapsulées dans une trame Ethernet qui est par la suite transmise sur le réseau Ethernet. Cette dernière arrive à la passerelle *Gw2* à $t = 0.75128ms$.
Les trames sont dés-encapsulées, puis transmises sur le bus 2. Les trames des flux 10 et 11 arrivent à destination respectivement aux instants $t = 0.87628ms$ et $t = 1.25128ms$.
- Le temporisateur de la trame du flux numéro 14 expire à l'instant $t = 0.925ms$. La trame est encapsulée dans une trame Ethernet qui est transmise sur le réseau Ethernet. Elle arrive à la passerelle *Gw3* à l'instant $t = 0.92628ms$. La trame du flux 14 est dés-encapsulée puis transmise sur le bus 3. Elle arrive à destination à l'instant $t = 1.12564ms$.
- Une trame du flux numéro 12 est transmise sur les bus 1 à $t = 0.875ms$, elle arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1ms$. À cet instant, aucune trame n'est en attente de transmission pour la destination de la trame du flux 12, une temporisation de $0.5ms$ est alors initiée. Cette trame sera transmise au maximum à l'instant $t = 1.5ms$.
- Une trame du flux numéro 13 est transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 1.14ms$, elle arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1.265ms$. À cet instant, aucune trame n'est en attente de transmission, une temporisation de $0.5ms$ est initiée. Ainsi la trame sera transmise au maximum à l'instant $t = 1.765ms$.
À $t = 1.44ms$, une trame du flux numéro 15 est transmise sur le bus 1. Cette trame arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1.565ms$. La trame du flux 13 étant déjà en attente de transmission vers le bus CAN 3, les trames 13 et 15 sont encapsulées dans une trame Ethernet qui est transmise sur le réseau. La trame arrive à la passerelle *Gw3* à l'instant $t = 1.56628ms$ où les trames sont dés-encapsulées et transmises sur le bus. Elles arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.80064ms$ et $t = 1.92564ms$.
- Le temporisateur de la trame du flux numéro 12 se termine à $t = 1.5ms$. À cet instant, la trame est encapsulée dans une trame Ethernet qui est transmise sur le réseau fédérateur. Elle arrive à la passerelle *Gw2* à $t = 1.50128$. Elle est dés-encapsulée puis transmise sur le bus 2. Elle arrive à destination à l'instant $t = 1.62628ms$.

5. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU ETHERNET COMMUTÉ

Le même schéma de transmission et d'encapsulation est appliqué pendant la seconde période de $2ms$ restante de ce scénario.

5.3.4 Stratégie de passerelle trois pour un; temporisateur de 1ms

La figure 5.7, illustre l'impact d'une stratégie de passerelle permettant l'encapsulation de trois trames CAN dans une trame Ethernet et implémentant un temporisateur de $1ms$ sur le réseau fédérateur.

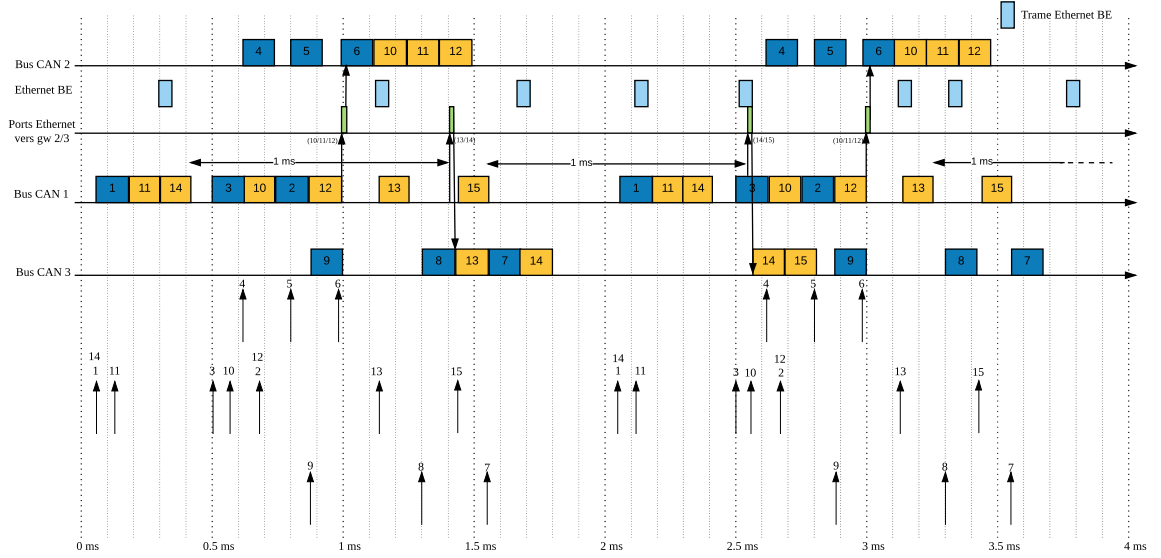


FIGURE 5.7 – Scénario avec trois trame CAN pour une trame Ethernet; Temporisation de 1ms

- Une trame distante du flux $f_1^{(1,2)}$ (numéros 11) est générée sur le bus CAN 1 à l'instant $t = 0.175ms$. Elle arrive à la passerelle $Gw1$ à l'instant $t = 0.3$.
En considérant une stratégie de passerelle *trois pour un temporisée*, la trame doit attendre l'arrivée de deux autres trames ayant le même bus de destination ou alors l'expiration du temporisateur à l'instant $t = 1.3ms$.
- Une trame du flux $f_2^{(1,3)}$ (numéro 14) est transmise sur le bus à l'instant $t = 0.3ms$ et arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 0.425ms$. Cette trame n'ayant pas le même bus de destination que la trame du flux numéro 11, elle doit attendre elle aussi deux autres trames. L'instant maximum de transmission de cette trame est $t = 1.425ms$.
- Une trame du flux numéro 10 commence sa transmission sur le bus 1 à l'instant $t = 0.625ms$ et arrive à la passerelle $Gw1$ à $t = 0.75ms$. Même si une instance de trame du flux numéro 11 est déjà en attente, les trames des flux 10 et 11 doivent attendre la fin du temporisateur ou l'arrivée d'une dernière trame avant leur transmission.
- Une trame du flux numéro 12 commence à être transmise sur le bus 1 à l'instant $t = 0.875$.

Cette trame arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1ms$. À cet instant, le nombre de trames à destination du bus CAN 2 est de trois. Les trames des flux 10, 11 et 12 sont encapsulées dans une trame Ethernet. Cette trame Ethernet est par la suite directement transmise sur le réseau fédérateur. Elle arrive à la passerelle *Gw2* à $t = 1.00136ms$. Les trames sont dés-encapsulées puis transmises sur le bus 2. Elles arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.23068ms$, $t = 1.35568ms$ et $t = 1.48068ms$.

- Une trame du flux numéro 13 commence sa transmission sur le bus 1 à l'instant $t = 1.14ms$. Elle arrive à la passerelle *Gw1* à $t = 1.265ms$ où une trame du flux numéro 14 est en attente de transmission. Les trames des flux 13 et 14 doivent attendre la fin du temporisateur de la trame du flux 14 ($t = 1.425ms$) ou l'arrivée d'une autre trame ayant la même destination avant d'être transmises.
- À l'instant $t = 1.425ms$, le temporisateur de la trame du flux 14 expire. Les trames des flux 13 et 14 sont encapsulées dans une trame Ethernet qui est transmise sur le réseau fédérateur. Cette trame arrive à la passerelle *Gw3* à l'instant $t = 1.42628ms$. Les trames sont dés-encapsulées puis transmises sur les bus 3. Elles arrivent à destination respectivement aux instants $t = 1.55128ms$ et $t = 1.80128ms$.

Les autres trames du scénario sont transmises suivant le même schéma de groupage de trames. Des deux exemples précédents, nous remarquons qu'une trame CAN peut être transmise seule ou accompagnée d'une ou de deux autres trames dans une trame Ethernet. De plus, les trames Ethernet best effort n'entrent pas en concurrence avec les trames CAN distantes.

L'utilisation des stratégies de passerelles groupées permet de réduire le nombre de trames sur le réseau Ethernet. Cette diminution du nombre de trames se fait au prix de l'introduction d'un délai au niveau des passerelles. Ce délai peut-être diminué par l'introduction des stratégies de passerelle temporisées. Sachant que le réseau Ethernet commuté ne présente pas de collisions sur le médium, la question qui se pose est *la pertinence de l'utilisation d'une stratégie autre que la stratégie basique (un pour un)?* Pour répondre à cette question, nous proposons dans la section suivante une analyse quantitative des différentes stratégies de passerelle.

5.4 Scenarii de simulation et résultats

L'objectif de la campagne de simulation menée est d'observer l'impact de différentes stratégies de passerelles sur les délais des flux du réseau. Pour cela, nous considérons l'architecture réseau décrite par la Figure 5.1.

Trois bus CAN sont considérés et connectés par trois passerelles (Gateway1, Gateway2, Gateway3) à un backbone Ethernet. Le réseau fédérateur Ethernet est composé de quatre commutateurs (Switch1, Switch2, Switch3, Switch4). Chaque commutateur est connecté en série avec les autres commutateurs. De plus, des nœuds Ethernet sont connectés à chaque commutateur et

5. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU ETHERNET COMMUTÉ

chaque passerelle interconnecte un bus CAN à un commutateur. Nous avons modélisé l'architecture réseau en utilisant le simulateur à événements discrets Omnet++ [57].

Nous avons considéré quatre stratégies de passerelles différentes dans nos scénarios de simulation:

- Une trame CAN par trame Ethernet
- Jusqu'à trois trames CAN par trame Ethernet avec un temporisateur de 0.1 ms
- Jusqu'à trois trames CAN par trame Ethernet avec un temporisateur de 0.3 ms
- Jusqu'à trois trames CAN par trame Ethernet avec un temporisateur de 0.5 ms

Les Tableaux 5.1 et 5.2 présentent la distribution des flux CAN et Ethernet sur le réseau. Quarante-sept flux CAN sont transmis sur l'architecture réseau: trente et un flux CAN locaux, seize flux CAN distants. De plus, dix flux Ethernet sont transmis sur le réseau fédérateur:

- Treize flux CAN locaux sont transmis sur le bus CAN 1
- Treize flux CAN locaux sont transmis sur le bus CAN 3
- Cinq flux CAN locaux sont transmis sur le bus CAN 2
- Huit flux CAN distants sont transmis sur le bus CAN 1, ces flux ont pour destination le bus CAN 2
- Huit flux CAN distants sont transmis sur le bus CAN 3, ces flux ont pour destination le bus CAN 2
- Dix flux Ethernet sont transmis sur le réseau fédérateur.

Dans cette étude, nous prenons aussi pour hypothèse que les flux CAN distants ont la plus basse priorité sur leur bus source et la priorité la plus élevée sur leur bus CAN de destination. Les flux CAN distants sont considérés comme étant les flux les plus prioritaires sur le réseau fédérateur Ethernet dans les cas PQSE (priorité 1) et AVB (classe de trafic SRA).

Identifiants	Pi (ms)	Tailles (bits)	Bus Src	Bus Dest	Type	Priorités PQSE	Priorités AVB
2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26	4	135	Bus 1	Bus 1	Local	-	-
28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42	4	95	Bus 1	Bus 2	Remote	1	SRA
69, 70, 71, 72, 73	2	135	Bus 2	Bus 2	Local	-	-
1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25	4	135	Bus 3	Bus 3	Local	-	-
27, 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41	4	95	Bus 3	Bus 2	Remote	1	SRA

TABLEAU 5.1 – Distribution des flux CAN

5.4. SCENARI DE SIMULATION ET RÉSULTATS

Flux Ethernet	$P_i(us)$	Tailles (octets)	Classe AVB	Priorité PQSE
fE_1	250	278	SRB	2
fE_2	250	278	SRB	2
fE_3	250	278	SRB	2
fE_4	250	278	SRB	2
fE_5	250	278	SRB	2
fE_6	300	278	SRB	2
fE_7	300	278	SRB	2
fE_8	300	375	SRB	2
fE_9	300	278	BE	3
fE_{10}	300	556	BE	3

TABLEAU 5.2 – Distribution des flux Ethernet

Les simulations effectuées évaluent les délais d'encapsulation, les délais de bout en bout ainsi que les délais des flux distants sur les réseaux Ethernet AVB et PQSE. Il est à noter que le crédit alloué aux files d'attente SRA, SRB et BE des commutateurs AVB représente respectivement 5%, 25% et 70% de la bande passante.

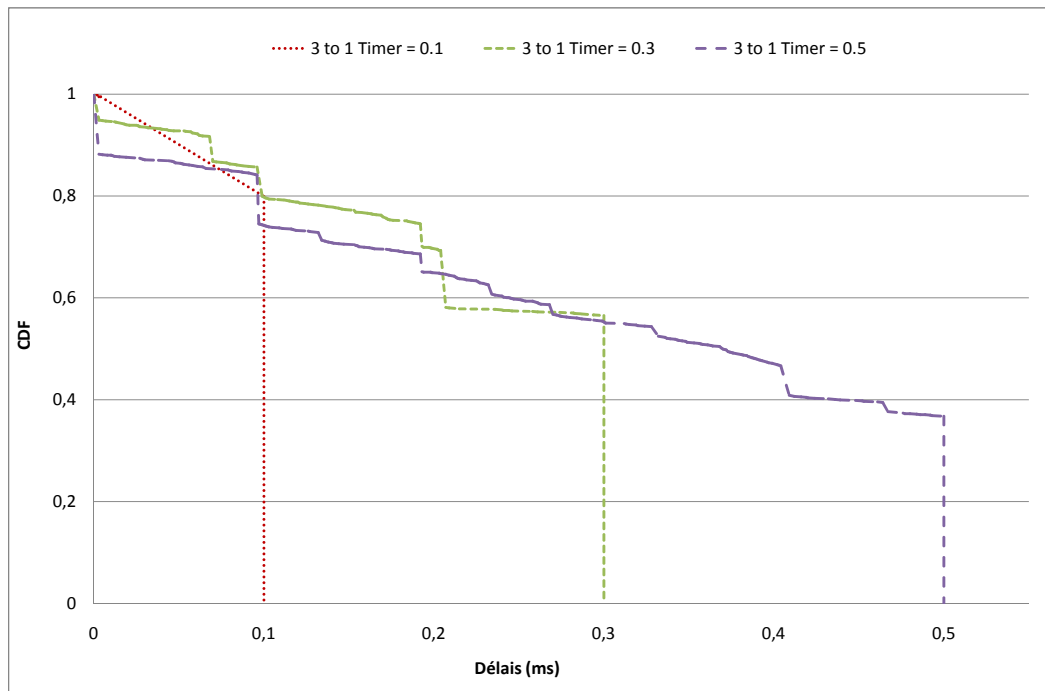


FIGURE 5.8 – Délais d'encapsulation des trames

5. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU ETHERNET COMMUTÉ

Le graphique 5.8 illustre le délai d'encapsulation des trames CAN dans leur passerelle d'entrée au réseau Ethernet et cela pour chacune des stratégies de passerelles temporisées considérées. Ainsi, pour chacun des flux distants, le délai introduit par les stratégies de passerelles fluctue entre zéro et la temporisation maximale attribuée à la stratégie de passerelles. Ce délai est introduit indépendamment de la technologie Ethernet utilisée (AVB où PQSE).

Trois cas de figure peuvent être dérivés du graphique:

1. L'obtention d'un délai d'attente équivalent à $0ms$ est possible uniquement si la trame considérée est arrivée à la passerelle à l'instant d'expiration du temporisateur, ou bien si la trame considérée est une trame qui nous permet de former une trame Ethernet contenant trois trames CAN.
2. L'obtention d'un délai d'attente au niveau de la passerelle inclus dans l'intervalle $]0ms, TemporisationMax[$ indique qu'une trame Ethernet contenant trois trames CAN peut être formée.
3. L'obtention d'un délai d'attente maximum au niveau de la passerelle résulte uniquement de l'expiration du temporisateur sans qu'un compte de trois trames CAN ne soit obtenu.

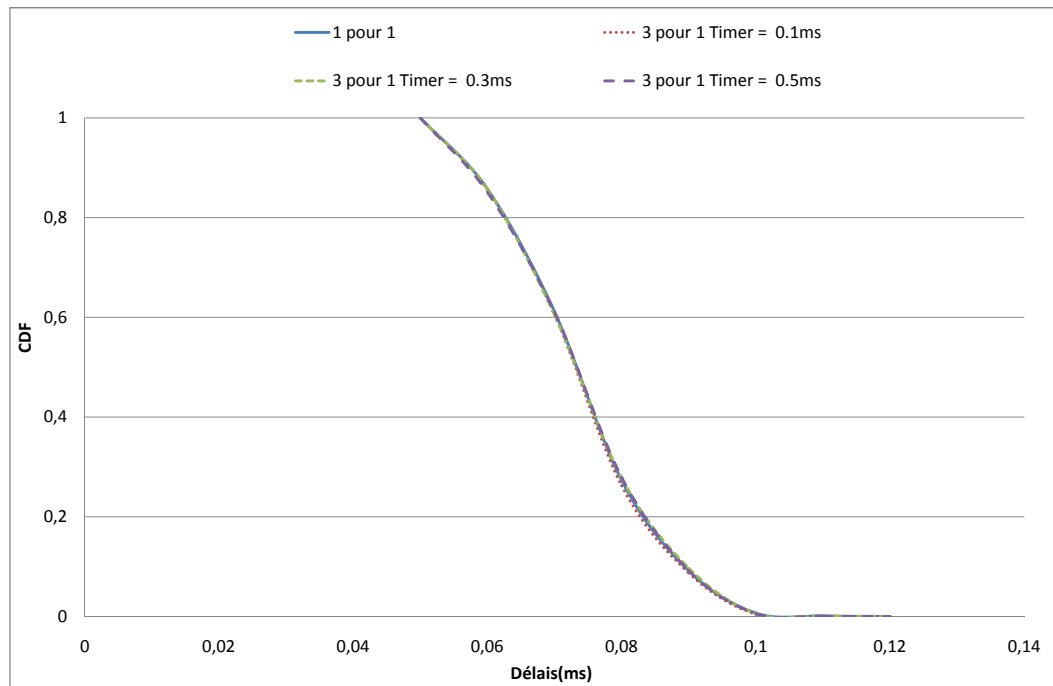


FIGURE 5.9 – Délais des flux CAN sur Ethernet PQSE

Le graphique 5.9 illustre pour chacune des stratégies de passerelles considérées les délais obtenus pour que les flux CAN distants traversent le réseau Ethernet PQSE (délais de la passerelle d'entrée à la passerelle de sortie).

Les courbes du graphique sont superposées, ceci indique que les stratégies de passerelles d'entrées n'ont aucun impact sur le délai des flux CAN distants lors de l'utilisation d'Ethernet PQSE.

L'obtention de ce résultat peut s'expliquer par le fait que les trames Ethernet transportant les trames CAN distantes ont la priorité la plus forte sur le réseau Ethernet. L'encapsulation d'une seule ou de plusieurs trames CAN dans une trame Ethernet va générer plus ou moins de trafic Ethernet. Ce trafic n'éprouve aucune concurrence pour l'accès au médium réseau et cela même lors de l'augmentation de la charge réseau. Les trames sont transmises immédiatement sur Ethernet PQSE. Ce mécanisme de transmission de trames peut pénaliser les trames de moindre priorité.

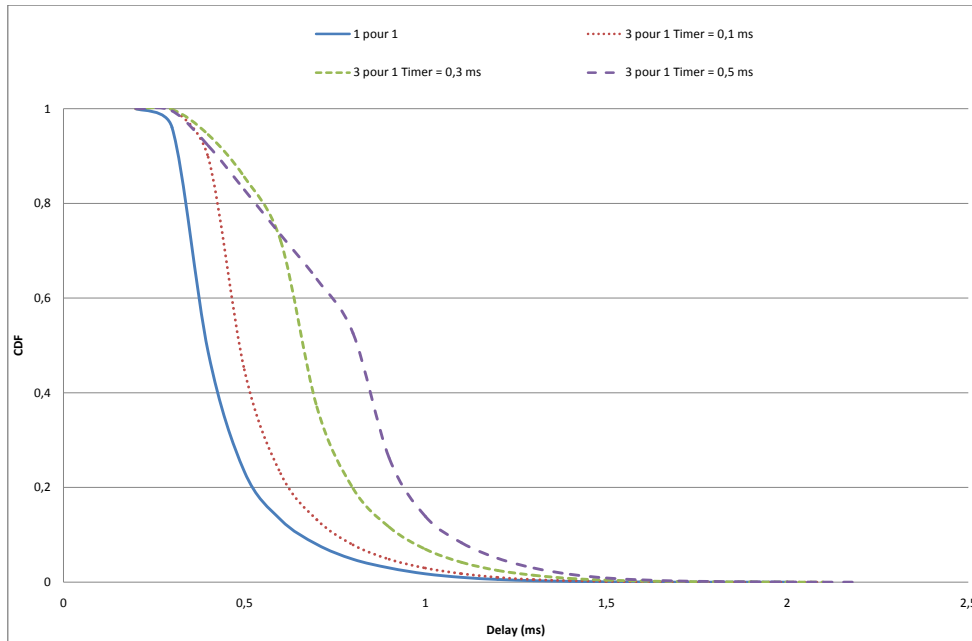


FIGURE 5.10 – Délais de bout en bout des flux CAN sur Ethernet PQSE

Le graphique 5.10 présente pour chacune des stratégies de passerelles considérées le délai de bout en bout des flux CAN distants (du nœud CAN source via le réseau Ethernet PQSE jusqu'au nœud CAN destination). Les courbes du graphique montrent que plus la valeur de la

5. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU ETHERNET COMMUTÉ

temporisation de la stratégie de passerelle augmente, plus les délais moyens et maximums observés des flux CAN augmentent. Ceci peut s'expliquer par les résultats présentés par le graphique précédent (graphique 5.9). En effet, du fait que les flux CAN distants sur le réseau Ethernet aient la priorité la plus élevée, ils sont transmis sur le réseau Ethernet en priorité et ne souffrent d'aucune concurrence. Ainsi, l'introduction d'une temporisation au niveau de la passerelle ne fait qu'ajouter du délai sans aucune contrepartie.

De l'étude des résultats obtenus dans les graphiques 5.9 et 5.10 il est clair que l'utilisation des stratégies de passerelles temporisées va uniquement introduire un temps supplémentaire au délai de bout en bout des trames CAN distantes lorsque l'on utilise un réseau fédérateur Ethernet implémentant un algorithme à priorité fixe.

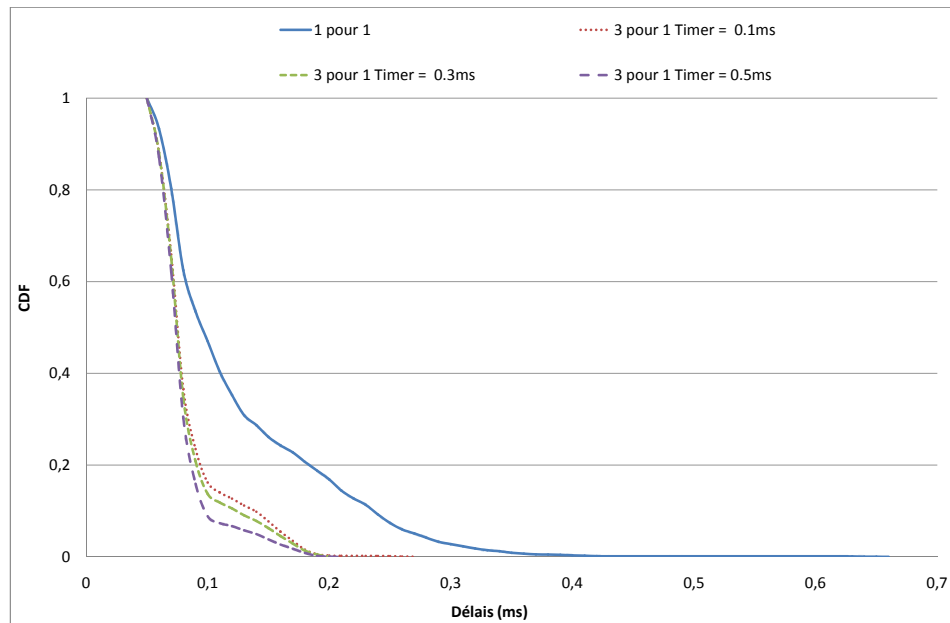


FIGURE 5.11 – Délais des flux CAN sur AVB

Le graphique 5.11 illustre pour chacune des stratégies de passerelles considérées les délais obtenus pour que les flux CAN distants traversent le réseau Ethernet AVB (délais de la passerelle d'entrée à la passerelle de sortie). Les différentes courbes du graphique montrent que plus le temporisateur de la stratégie de passerelle augmente, plus les délais des trames CAN distantes sur le réseau AVB diminuent. Ceci indique que l'introduction d'une stratégie de passerelle temporisée a un impact positif sur le délai des flux transmis sur ce même réseau. Cela trouve son explication par le fait que sur Ethernet AVB, ne pas encapsuler plus d'une trame CAN dans une

trame Ethernet génère un nombre élevé de trames sur le réseau Ethernet. Ceci conduit à une consommation plus importante du crédit alloué à la file d'attente associée au flux considéré. Ainsi, plus l'on génère de trames Ethernet, plus le temps d'attente au niveau des commutateurs est élevé (les trames doivent attendre la restitution du crédit initial avant leur transmission).

Le graphique 5.12 présente pour chacune des stratégies de passerelles considérées le délai de bout en bout des flux CAN distants sur le réseau (du nœud CAN source via le réseau Ethernet AVB jusqu'au nœud CAN destination). Les courbes du graphique montrent que plus la valeur de la temporisation de la stratégie de passerelle augmente, plus les délais moyens et maximums observés des flux CAN distants augmentent. L'utilisation de stratégies de passerelles temporisées permet d'améliorer les délais obtenus sur le réseau fédérateur AVB. Ce gain de délai ne compense pas le délai introduit au niveau de la passerelle.

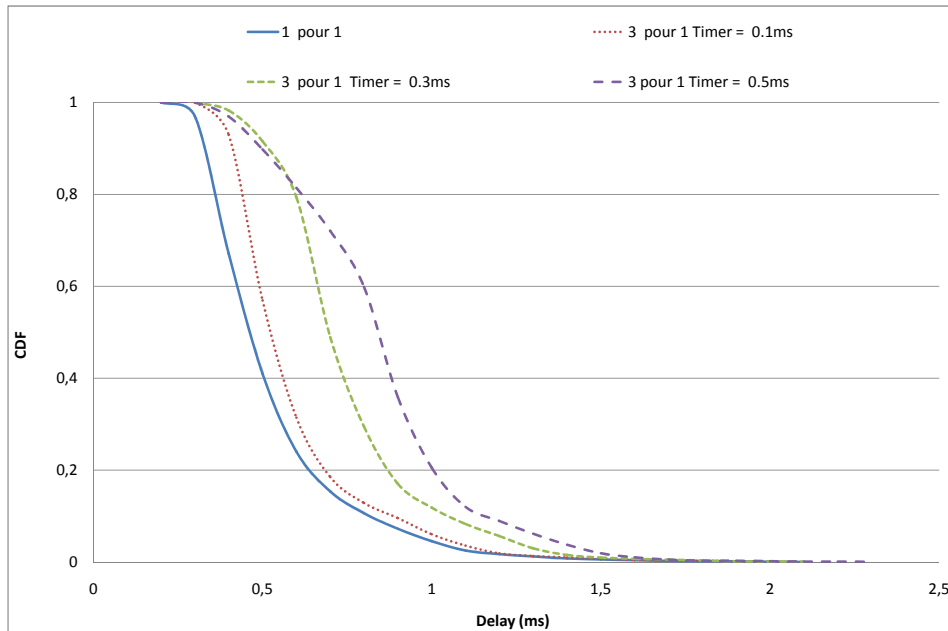


FIGURE 5.12 – Délais de bout en bout des flux CAN sur AVB

De l'étude des résultats obtenus dans les graphiques 5.11 et 5.12 nous concluons que l'introduction d'une stratégie de passerelle temporisée pour une architecture réseau hétérogène CAN/Ethernet-AVB n'apporte aucune valeur ajoutée.

Cette étude par simulation nous a permis de vérifier l'impact que peut avoir l'utilisation de différentes stratégies d'encapsulation lorsqu'un réseau fédérateur Ethernet commuté est consi-

déré.

Nous avons dans un premier temps évalué cet impact lors de l'utilisation d'Ethernet-PQSE. Il est apparu que les stratégies de passerelles temporisées n'ont fait qu'introduire un délai supplémentaire aux délais de bout en bout des flux.

Dans un second temps nous avons évalué l'impact de ces mêmes stratégies lors de l'utilisation d'Ethernet-AVB. L'introduction des stratégies de passerelles temporisées a permis de réduire la consommation de crédit associé à la file d'attente SRA correspondant aux flux CAN distants et par conséquent améliorer les délais de ces flux sur le réseau fédérateur. Cependant, le délai introduit par les différentes stratégies temporisées n'est pas compensé par le gain obtenu sur le réseau Ethernet. Ainsi, il est clair qu'encapsuler *une seule trame CAN dans une trame Ethernet* est la meilleure stratégie de passerelle à utiliser lorsqu'un réseau fédérateur de type Ethernet commuté est considéré.

Dans ce chapitre ainsi que dans le chapitre précédent, nous nous sommes principalement intéressés à la passerelle d'entrée du réseau fédérateur. Nous avons montré l'impact de différentes stratégies d'encapsulation sur les délais des flux. Dans le restant de ce chapitre, nous nous focalisons sur la passerelle de sortie du réseau fédérateur. Nous proposons et évaluons l'impact d'une régulation de trafic sur le délai moyen. Une telle régulation facilite le calcul d'une borne supérieure sur les délais pire cas. Pour cela, nous présentons une étude sur une architecture réseau simple. Dans un premier temps, nous exposons l'impact de la régulation du trafic sur un scénario sélectionné puis, dans un second temps, nous généralisons l'étude sur des scénarios aléatoires.

5.5 Stratégies de passerelle de sortie

Comme montré dans les études de cas précédentes, une trame CAN distante est transmise via les équipements du réseau fédérateur. Ainsi, lorsqu'une trame CAN distante est émise sur le bus source, elle est transmise à la passerelle d'entrée où elle est encapsulée dans une trame du réseau fédérateur. Cette trame est par la suite transmise sur le réseau à destination de la passerelle de sortie. À l'arrivée de la trame au niveau de la passerelle de sortie, la trame CAN contenue est extraite, puis émise sur le bus destination. C'est à ce dernier segment du réseau que s'intéresse cette étude de cas (passerelle de sortie vers bus CAN de destination). Plus concrètement, l'étude vise les différentes stratégies de passerelles de sortie qui peuvent être implémentées et leurs impacts sur les délais des flux CAN distants et locaux. L'architecture réseau considérée est présentée dans les paragraphes suivants.

5.5.1 Une Architecture réseau CAN/Ethernet commuté

La Figure 5.13 présente l'architecture réseau hétérogène que nous avons considérée. Le réseau est composé de trois bus CAN interconnectés par trois passerelles ($G1, G2, G3$). Chaque passerelle relie un bus CAN au commutateur Ethernet.

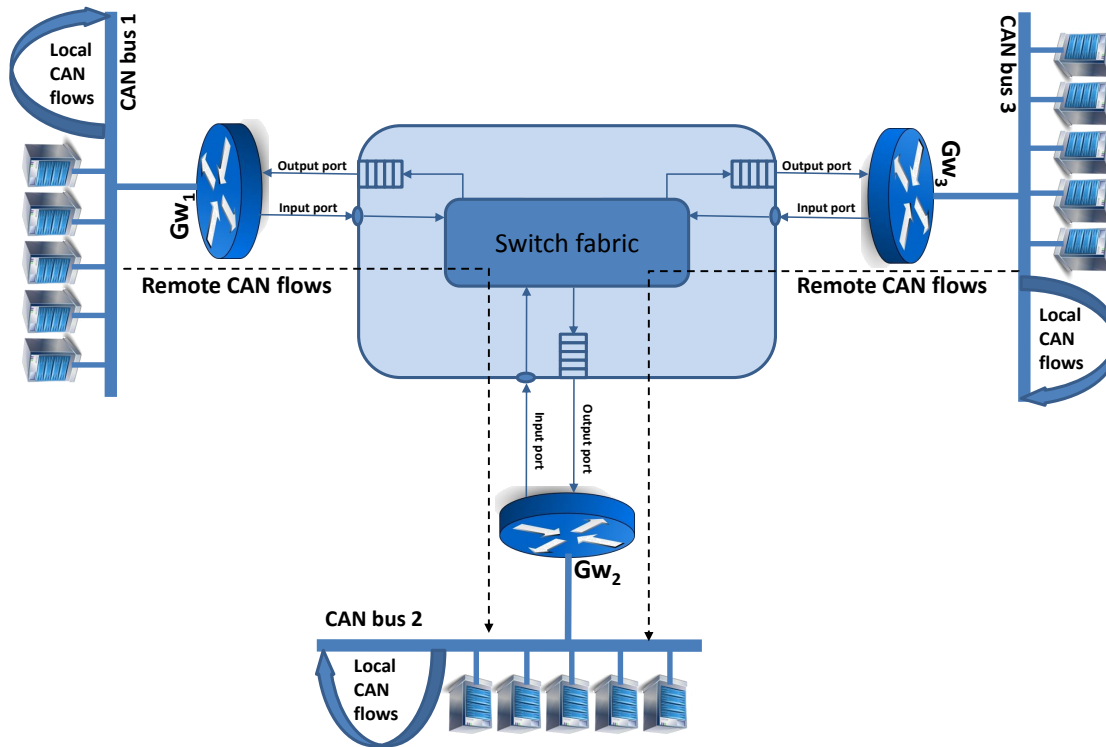


FIGURE 5.13 – Une architecture réseau hybride simple

Dans cet exemple, nous retrouvons uniquement des flux CAN locaux et distants. Nous avons montré au paragraphe précédent qu'une stratégie d'encapsulation basique *un pour un* donne les meilleurs résultats. Nous utilisons donc cette stratégie pour la passerelle d'entrée.

Le principal rôle de la passerelle de sortie est de recevoir les trames Ethernet arrivant du réseau fédérateur, de dés-encapsuler les trames CAN distantes qu'elles contiennent et enfin de transmettre les trames CAN sur le bus de destination. Nous distinguons deux stratégies distinctes de transmission des trames CAN sur le bus de destination:

1. Stratégie de transmission immédiate des flux (Immediate forwarding strategy). Dans cette stratégie de transmission, les trames CAN distantes sont dés-encapsulées au niveau de la passerelle et directement prêtes à être transmises. La transmission immédiate des trames CAN distantes par leur passerelle de sortie peut réduire considérablement la durée entre les instants où deux trames consécutives d'un flux peuvent être prêtes sur leur bus destination. Cela peut impacter négativement les délais des flux CAN locaux en les augmentant. Ceci est valable pour les délais pire cas de ces flux, car leur dérivation est une fonction de la

période (ou période généralisée) de tous les flux transmis sur le bus CAN destination [58].

2. Stratégie de transmission par régulation du trafic des flux (Traffic shaping strategy). Dans cette stratégie de transmission, les trames CAN distantes peuvent être retardées après leurs dés-encapsulations au niveau de leur passerelle de sortie. L'objectif de cette stratégie est de garantir une durée minimale entre deux trames consécutives d'un flux distant sur le bus de destination. Cette période minimale, garantit qu'aucun engorgement de trafic n'est créé par les flux reçues sur le bus CAN de destination. Ainsi, les flux locaux d'un bus de destination ne sont plus retardés par un potentiel engorgement de trafic, Par conséquent, leur délai pire cas n'est plus augmenté.

5.5.2 Impact des stratégies de passerelle de sortie

Cette section illustre l'impact des stratégies de passerelles de sortie sur les délais des flux locaux et distants du bus CAN 2.

Dans un premier temps, sur un scénario sélectionné, nous présentons l'impact des stratégies de passerelles à transmission immédiate et à régulation du trafic sur les délais des flux. Dans un second temps, l'impact de ces mêmes stratégies est présenté sur des scénarios aléatoires.

Identifiant	P_i (ms)	Longueur (bits)	Src bus	Dest bus	Type
1, 3, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29	4	135	1	1	Local
5	2	75	1	1	Local
38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47	2	135	2	2	Local
2, 4, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30	4	135	3	3	Local
6	2	75	3	3	Local
31	2	135	1	2	Distant
32	2	135	3	2	Distant

TABLEAU 5.3 – Configuration réseau

Nous considérons l'architecture réseau présentée par la Figure 5.13. Quarante-deux flux sont transmis sur cette architecture comme le présente le Tableau 5.3.

- Quinze de ces flux sont locaux au bus 1
- Quinze de ces flux sont locaux au bus 3
- Dix de ces flux sont locaux au bus 2
- Un flux distant a pour origine le bus 1 et pour destination le bus 2
- Un flux distant a pour origine le bus 3 et pour destination le bus 2

De plus, comme le montrent les identifiants des flux CAN, nous considérons que les flux distants ont la priorité la plus faible sur leurs bus sources respectifs et la plus haute sur le bus destination.

Dans les paragraphes suivants, nous montrons l'impact des différentes stratégies sur un scénario spécifique. L'impact sur un ensemble aléatoire de scénarios est mesuré par simulation dans la section 5.5.2.2.

5.5.2.1 Transmission immédiate VS régulation du trafic sur un scénario sélectionné

Les gignes de démarrage de tous les flux sont supposées nulles. La première trame de chaque flux est prête à être émise à l'instant 0. La Figure 5.14 montre l'ordonnancement des transmissions des trames sur les trois bus lorsque deux stratégies de passerelles différentes sont considérées par la passerelle G2: une stratégie de transmission immédiate (Figure 5.14-partie supérieure) et une stratégie de transmission par régulation de trafic (Figure 5.14-partie inférieure).

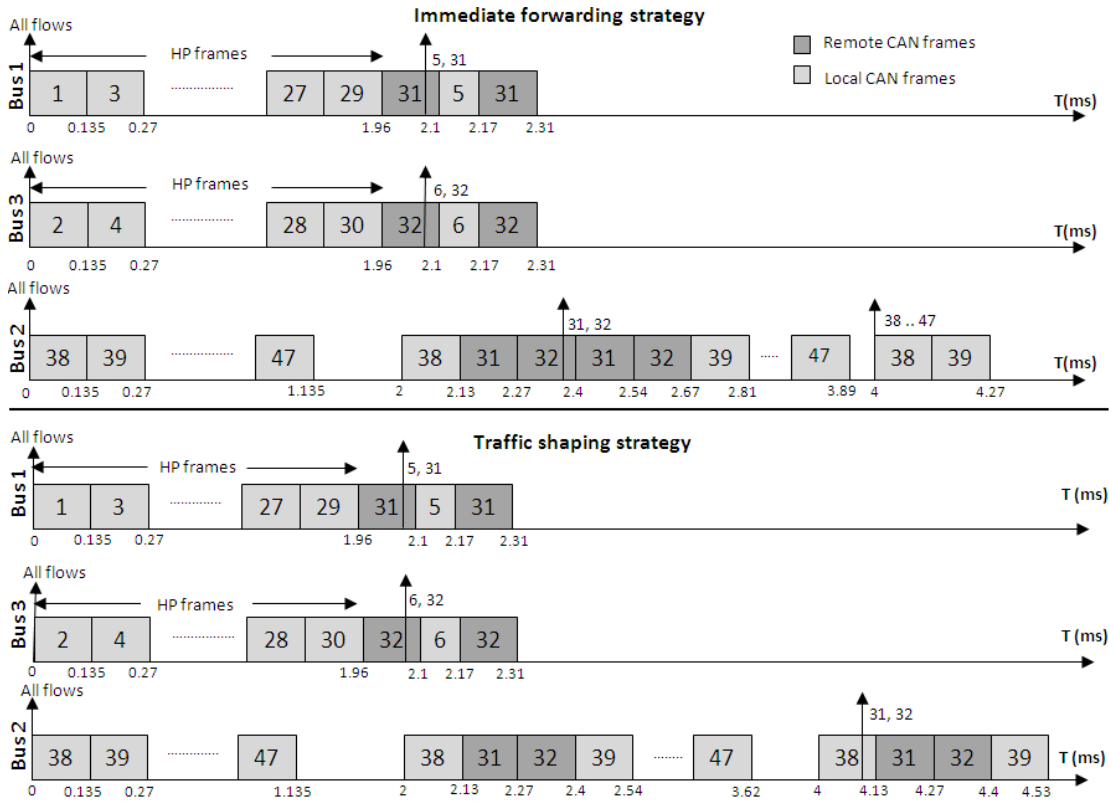


FIGURE 5.14 – Transmission immédiate VS régulation du trafic

Dans les deux cas, les trames locales et distantes des bus 1 et 3 sont émises dans l'ordre

5. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU ETHERNET COMMUTÉ

croissant de leurs priorités entre les instants 0 et $2,1ms$.

Les trames distantes 31 et 32 sont prêtes à être transmises sur le bus 2 à l'instant $2,115ms$. Sur ce bus, les dix trames locales prêtes à l'instant 0 sont émises entre l'instant 0 et $1,135ms$.

À l'instant $2ms$, dix autres trames des flux locaux du bus 2 sont prêtes pour transmission. La trame la plus prioritaire (flux 38) est émise à l'instant $2ms$, étant donné que les trames 31 et 32 ne sont pas encore prêtes.

À la fin de l'émission de la trame 38, les trames 31 et 32 sont arrivées et sont émises à leur tour. L'émission des trames 31 et 32 se termine à l'instant $2,4ms$. Pendant ce temps, une seconde trame des flux 31 et 32 arrive à $G2$. Ces trames ont été générées sur les bus 1 et 3 à l'instant $2ms$ et ont été transmises après les trames 5 et 6 qui ont été générées en même temps. À cet instant, l'ordonnancement des transmissions sur le bus 2 est lié à la stratégie de pontage appliquée au niveau de la passerelle de sortie.

Lorsque la stratégie de transmission immédiate est appliquée (Figure 5.14-partie supérieure), les trames 31 et 32 sont prêtes dès qu'elles sont reçues par $G2$ à l'instant $2,315ms$. Les trames sont transmises entre les instants $2,4ms$ et $2,67ms$ en retardant les trames des flux de 39 à 47. Lorsque la stratégie de régulation de trafic est utilisée (Figure 5.14-partie inférieure), les trames 31 et 32 attendent au niveau de $G2$ jusqu'à ce qu'une période (i.e. $2ms$) se soit écoulée depuis l'arrivée des trames précédentes des mêmes flux. Les trames sont alors prêtes à être transmises à l'instant $4,13ms$.

Grâce à ce retard, les trames des flux locaux sont émises plus tôt que lors de l'utilisation de la stratégie de transmission immédiate au niveau de la passerelle $G2$. Nous pouvons conclure que sur ce scénario précis, le délai des secondes trames des flux 39 à 47 est réduit de $0,270ms$ lorsque la stratégie de régulation de trafic est appliquée.

5.5.2.2 Transmission immédiate VS régulation du trafic sur des scénarios aléatoires

L'exemple de la section précédente montre que réguler le trafic au niveau des passerelles de sortie peut permettre d'améliorer le délai des flux locaux. La question qui se pose est: l'impact sur les délais est-il significatif si l'on considère des scénarios aléatoires et des bus CAN non synchronisés?

Pour répondre à cette question, nous avons mené une campagne de simulation basée sur l'architecture réseau présentée par la Figure 5.13 ainsi que sur la description des flux donnée par le Tableau 5.3.

Nous avons modélisé l'architecture réseau de la Figure 5.13 en employant le simulateur Omet++ . Dans un premier temps, nous avons considéré des passerelles mettant en œuvre une

5.5. STRATÉGIES DE PASSERELLE DE SORTIE

stratégie de passerelle à transmission immédiate des flux (section 5.5). Dans un second temps, nous avons considéré des passerelles mettant en œuvre la stratégie de transmission par régulation de trafic. La génération des gigue de démarrage des flux est aléatoire.

Identifiants	Max trans. immédiate(ms)	Max régul. trafic(ms)	Moyenne trans. immédiate(ms)	Moyenne régul. trafic(ms)
31	2.145	2.159	0.440	0.518
32	2.175	2.226	0.446	0.525
38	0.543	0.542	0.200	0.199
39	0.679	0.677	0.208	0.208
40	0.875	0.815	0.219	0.219
41	0.951	0.943	0.232	0.232
42	1.124	1.085	0.248	0.248
43	1.292	1.222	0.268	0.268
44	1.451	1.359	0.293	0.293
45	1.610	1.495	0.323	0.323
46	1.747	1.631	0.363	0.363
47	1.815	1.632	0.415	0.414

TABLEAU 5.4 – Maximum et moyenne des délais de bout en bout

Le Tableau 5.4 présente les délais maximaux et moyens des transmissions de bout en bout obtenus par simulation pour les flux transmis sur le bus 2, en appliquant les stratégies précédemment présentées. Les simulations montrent que la stratégie de régulation de trafic sur la passerelle de sortie *G2* augmente le maximum et la moyenne des délais de bout en bout pour les flux distants. Ceci est dû à l'introduction d'un délai d'attente au niveau de la passerelle.

Les résultats des simulation montrent que la régulation du trafic des flux distants réduit le délai maximum observé pour les flux CAN locaux (e.x. de 1,815ms à 1,632ms pour le flux 47). Cela corrobore l'impact de réduction de délais de la régulation de trafic que nous avons obtenu sur un scénario particulier (section 5.5.2.1).

En revanche, la stratégie sur la passerelle de sortie a peu d'impact sur le délai moyen des flux locaux. En effet, réguler le trafic peut diminuer ou augmenter le délai d'une trame d'un flux local. Cet effet est illustré par l'exemple de la Figure 5.14. En effet, le délai de la seconde trame du flux 39 diminue de 0,81ms à 0,54ms, alors que le délai de la troisième trame de ce flux augmente de 0,27ms à 0,535ms.

Cette étude de cas a présenté une architecture réseau interconnectant un bus CAN à un réseau Ethernet commuté. Dans cette étude, nous avons plus particulièrement traité la passerelle de sortie du réseau fédérateur. À cette passerelle, nous avons introduit un mécanisme de régulation

5. INTERCONNEXION PAR UN RÉSEAU ETHERNET COMMUTÉ

de trafic permettant de recréer la période d'un flux reçu. Nous avons évalué ce mécanisme et l'impact qu'il pouvait avoir sur les délais des flux CAN du bus de destination. À partir d'un scénario sélectionné et par le biais de simulations, nous avons montré que le mécanisme introduit permettait de réduire les délais pire cas observés en retardant légèrement les trames CAN distantes au niveau de la passerelle.

5.6 Conclusion

Ce chapitre a traité de l'interconnexion de bus spécifiques CAN via un réseau fédérateur de type Ethernet commuté. Ce type d'interconnexion est effectué via des passerelles permettant l'encapsulation des trames CAN dans des trames Ethernet commuté. Les passerelles étant des éléments-clés du réseau, nous nous sommes intéressés aux différentes stratégies pouvant être implémentées sur ces dernières.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux passerelles d'entrées du réseau fédérateur. Nous avons considéré une architecture réseau composée de plusieurs bus CAN distants interconnectés via un réseau fédérateur Ethernet-AVB, d'une part, et un réseau fédérateur Ethernet à priorité stricte, d'autre part.

Nous avons évalué l'impact des stratégies de passerelles sur ce type de réseau par simulation. Ainsi, nous avons mesuré les délais des flux lors de l'utilisation des stratégies d'encapsulation temporisées. Puis, nous avons comparé ces délais aux délais obtenus lors de l'utilisation de la stratégie de passerelle la plus basique qui consiste à encapsuler une trame CAN dans une trame du réseau fédérateur.

À l'obtention des résultats de simulations, il est clairement apparu qu'encapsuler plusieurs trames CAN dans une trame Ethernet n'avait aucun impact lorsqu'un réseau Ethernet à priorité fixe était considéré. Sur un réseau Ethernet-AVB en revanche, encapsuler plusieurs trames CAN dans une trame AVB permet de consommer moins de crédit et ainsi diminuer le délai des trames sur ce même réseau. Cependant, cette diminution de délai n'ayant pas un impact assez significatif, elle ne permet pas une diminution du délai de bout en bout des flux CAN distants.

Ainsi, l'introduction de stratégies de passerelles élaborées ne permet pas de diminuer le délai de bout en bout. Nous en avons conclu que la meilleure stratégie de passerelle d'entrée à mettre en œuvre lors de l'interconnexion de bus CAN distants via un réseau fédérateur Ethernet commuté est la stratégie *un pour un*.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux passerelles de sorties du réseau fédérateur. Nous avons présenté une étude portant sur l'interconnexion de bus CAN distants via un commutateur Ethernet FIFO. Nous avons introduit un mécanisme permettant de réguler le trafic au niveau de la passerelle de sortie. Puis, nous avons évalué ce mécanisme en le comparant avec le cas où les trames sont transmises directement au bus de destination. Pour cela, nous avons sélectionné un scénario spécifique qui a permis de montrer qu'un gain sur le délai maximum des flux CAN locaux au bus de destination était possible. Par la suite, nous avons généralisé ce résultat via une campagne de simulation qui a montré que la régulation du trafic permettait de réduire le délai maximum observé des flux locaux sans augmenter excessivement le délai des flux CAN distants.

6 Conclusion et Perspectives

6.1 Conclusion

Les réseaux embarqués avioniques et automobiles deviennent de plus en plus complexes et doivent intégrer de nombreux bus spécifiques pour relier capteurs et actionneurs. De plus dans l'industrie aéronautique, le standard de réseau Ethernet commuté full duplex ([AFDX](#) ou ARINC 664) est de plus en plus utilisé pour mettre en œuvre les architectures avioniques modulaires intégrées (ou IMA), même si des bus spécifiques (ARINC 429 ou CAN) subsistent pour relier les capteurs et actionneurs. Dans l'industrie automobile, les tentatives de remplacement des bus spécifiques par des réseaux MOST ou FlexRay n'ont pas toutes été couronnées de succès et les solutions de type Ethernet commuté temps réel (AVB) sont de plus en plus envisagées. Les réseaux de type Ethernet commuté temps réel sont donc loin de pouvoir remplacer l'ensemble des bus spécifiques traditionnels, mais ils peuvent être vu comme des réseaux fédérateurs permettant d'interconnecter des bus spécifiques (existants) reliant capteurs et actionneurs. L'introduction de ce type d'architecture réseau permet de tirer parti de l'augmentation de débit du réseau pour des coûts de développement relativement faibles. Il faut cependant définir le rôle des passerelles entre réseau spécifique et réseau fédérateur et vérifier que les contraintes temporelles des délais de communication de bout en bout sont bien vérifiées.

Dans cette thèse, nous avons tout d'abord présenté l'évolution des réseaux embarqués, et avons décrit les différentes technologies réseaux dédiées au domaine automobile ([CAN](#), [LIN](#) et FlexRay) et au domaine avionique (ARINC 429, ARINC 629 et [AFDX](#)). Nous avons mis en exergue les différentes solutions Ethernet orientées temps-réel (Ethernet commuté, [AVB](#) et TTEthernet) et sans fil (Wi-Fi, Bluetooth et ZigBee).

Nous avons ensuite introduit une architecture de réseaux hétérogènes composée de bus spécifiques CAN distants interconnectés via des passerelles par encapsulation à un réseau fédérateur qui peut être un réseau Ethernet classique, un réseau Ethernet commuté ou un réseau sans fil de type WI-FI.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les passerelles d'interconnexion sont les points-clés de ce type d'architecture. Elles doivent garantir les contraintes des flux critiques tout en optimisant les performances pour les autres flux. Nous nous sommes donc intéressés dans un premier temps à la définition des différentes stratégies de passerelles et nous les avons comparés dans un deuxième temps à travers deux exemples d'interconnexion.

Les différentes stratégies de passerelles que nous avons introduites sont:

- Une stratégie d'encapsulation basique, où une trame CAN est encapsulée dans une trame du réseau fédérateur. Cette stratégie favorise le délai des trames des bus CAN mais introduit une surcharge au niveau du réseau fédérateur, car les passerelles génèrent un nombre élevé de trames.
- Une stratégie groupée, où n trames CAN sont encapsulées dans une trame du réseau fédérateur. Cette stratégie minimise la surcharge introduite par la passerelle sur le réseau fédérateur, mais introduit un délai important sur le délai des trames CAN encapsulées, car tant que n n'est pas atteint, les trames déjà encapsulées sont retardées.
- Une stratégie temporisée, où les trames CAN sont encapsulées dans une trame du réseau fédérateur tant que n n'est pas atteint ou tant que la valeur du temporisateur n'est pas atteinte. Cette stratégie est un compromis entre les autres stratégies proposées. Elle agit comme une balance entre la surcharge introduite sur le réseau fédérateur et le délai supplémentaire introduit aux trames CAN.

Nous avons analysé l'impact des différentes stratégies de passerelles, sur deux types d'architectures de réseaux hétérogènes utilisant deux réseaux fédérateurs différents.

- Une architecture réseau hétérogène interconnectant des bus CAN distants via un réseau Wi-Fi (IEEE 802.11g). Cette architecture réseau est flexible et permet la transmission de flux réseau ayant des contraintes temporelles souples.
- Une architecture réseau hétérogène interconnectant des bus CAN distants via un réseau Ethernet commuté (le réseau Ethernet pouvant être un Ethernet commuté SPQ ou un réseau Ethernet AVB). Cette architecture permet d'obtenir des communications temps réel à contraintes fortes où il est essentiel de s'assurer que le réseau dans sa globalité garantit les délais de bout en bout des flux.

Dans la première étude, nous avons montré par simulation, sur différents exemples qu'en utilisant une stratégie de passerelles temporisée les échéances dépassées des trames CAN transmises sur le réseau sans fil peuvent être limitées. En effet, l'encapsulation de plusieurs trames CAN

dans chaque trame Wi-Fi tout en bornant le temps d'attente de chaque trame CAN permet de réduire les collisions sur le support sans fil. L'utilisation de cette stratégie de passerelle est incontournable pour ce type de réseau hétérogène. De plus, ce constat fait de cette architecture un bon candidat pour la transmission de flux à contraintes souples.

Dans la deuxième étude, nous avons montré, également par simulation, sur des réseaux fédérateurs Ethernet commuté que l'utilisation d'une stratégie de passerelle temporisée n'avait pas d'impact significatif. Sur un réseau Ethernet à priorité fixe la stratégie de passerelle temporisée n'a aucun impact. Sur un réseau fédérateur Ethernet-AVB, la stratégie de passerelle permet de diminuer la consommation du crédit, mais ce gain ne permet pas de diminuer le délai de bout en bout des flux CAN distants. L'utilisation d'une stratégie de passerelle basique est conseillée pour ce type d'architecture.

Nous avons ensuite introduit un mécanisme permettant de réguler le trafic au niveau de la passerelle de sortie (passerelle du bus de destination). Nous avons évalué ce mécanisme en le comparant à une transmission immédiate des trames sur le bus de destination. De cette comparaison il est apparu que la régulation de trafic permettait de réduire le délai maximum observé des flux locaux sans augmenter excessivement le délai des flux CAN distants.

6.2 Perspectives

Les travaux que nous avons menés sur les stratégies de passerelles permettant d'interconnecter des réseaux spécifiques (de type CAN) via un réseau fédérateur (de type Ethernet commuté ou WI-FI) se sont appuyés sur une démarche de modélisation et de simulation. Cette démarche a permis de valider les apports des différentes techniques de passerelles proposées. Une implémentation de ces concepts et leur test sur des configurations réseaux réelles permettraient de compléter et recalibrer les résultats obtenus.

D'autre part, dans cette thèse, nous nous sommes basés uniquement sur le protocole CAN pour la partie bus spécifique. Il serait alors intéressant d'introduire d'autres types de bus spécifiques (tels que TTCAN, LIN, ARINC 825, ...) qui présentent plusieurs similarités avec les bus CAN natifs. Cependant, même si les mécanismes d'encapsulation semblent être aisément transposés, une étude des processus de régulation de trafic sur les bus destination serait à faire.

De même, nous avons ciblé plusieurs réseaux fédérateurs (de type Ethernet commuté et WIFI). Il est nécessaire d'élargir la liste des réseaux pris en compte aussi bien au niveau filaire (TTEthernet, AFDX, ...) qu'au niveau sans fil (HCCA, WirelessHART ...). Selon les configurations envisagées, il convient d'analyser et compléter les différentes stratégies de passerelles.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Enfin la démarche menée par modélisation et simulation a conduit à une analyse du comportement moyen des mécanismes proposés, celle-ci doit être prolongée par une analyse pire cas des délais de communication de bout en bout, en particulier pour les architectures fortement contraintes temporellement. Une des difficultés d'une telle analyse pire cas est alors le pessimisme induit dans le cas d'architecture de réseaux hétérogènes.

Bibliographie

- [1] R. Bigot and P. Croutte, “La diffusion des technologies de l’information et de la communication dans la société française (2012),” 2012.
- [2] M. Lefranc, C. Capel, A.-S. Pruvot-Occean, A. Fichten, C. Desenclos, P. Toussaint, D. L. Gars, and J. Peltier, “Frameless robotic stereotactic biopsies: a consecutive series of 100 cases,” *Journal of Neurosurgery*, vol. 122, no. 2, pp. 342–352, 2015, pMID: 25380111. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS14107>
- [3] R. Limpert, *Brake design and safety*, 1999.
- [4] K. G. Johnson, K. Mollenhauer, and H. Tschöke, *Handbook of diesel engines*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [5] A. R. Klumpp, “Apollo lunar descent guidance,” *Automatica*, vol. 10, no. 2, pp. 133 – 146, 1974. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109874900193>
- [6] “ISO International Standard 11898- Road vehicles – Interchange of digital information – Controller area network (CAN) for high-speed communication,” 1993.
- [7] “ISO International Standard 17987- Road vehicles – Local Interconnect Network (LIN) – Part 7: Electrical Physical Layer (EPL) conformance test specification,” 2016.
- [8] “ISO 17458-1:2013 Preview Road vehicles – FlexRay communications system – Part 1: General information and use case definition,” 2013.
- [9] “ARINC Specification 429, ”Digital Information Transfer System (DITS),” 2004.
- [10] “ARINC Specification 629, ’Multi-Transmitter Data Bus, Part 1-Technical Description’,” 2004.
- [11] “AIRCRAFT DATA NETWORK PART 7 AVIONICS FULL-DUPLEX SWITCHED ETHERNET NETWORK,” 2009.

BIBLIOGRAPHIE

- [12] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Audio Video Bridging (AVB) Systems,” *IEEE Std 802.1BA-2011*, pp. 1–45, Sept 2011.
- [13] H. Kopetz, A. Ademaj, P. Grillinger, and K. Steinhammer, “The time-triggered ethernet (tte) design,” in *Object-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2005. ISORC 2005. Eighth IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 22–33.
- [14] I. C. S. L. M. S. Committee *et al.*, “Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications,” 1997.
- [15] “IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. - Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs),” *IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002)*, pp. 0_1–580, 2005.
- [16] “IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirement Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs),” *IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, pp. 1–203, 2007.
- [17] R. Davis, S. Kollmann, V. Pollex, and F. Slomka, “Controller area network (can) schedulability analysis with fifo queues,” in *Real-Time Systems (ECRTS), 2011 23rd Euromicro Conference on*, 2011, pp. 45–56.
- [18] B. Emaus, “Hitchhiker’s guide to the automotive embedded software universe, 2005. keynote presentation at seas’05 workshop.”
- [19] B. Phelps, “Magnetic recording method,” Dec. 18 1956, uS Patent 2,774,646. [Online]. Available: <https://encrypted.google.com/patents/US2774646>
- [20] “Standard: ARINC 419 DIGITAL DATA SYSTEM COMPENDIUM,” 1984.
- [21] “IEEE Standards for Local Area Networks: Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications,” *ANSI/IEEE Std 802.3-1985*, pp. 0_1–, 1985.
- [22] “IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications - Maintenance 7,” *IEEE Std 802.3aj-2003 (Amendment to IEEE Std 802.3-2002)*, pp. 1–78, 2003.

- [23] J. P. Georges, T. Divoux, and E. Rondeau, "Strict priority versus weighted fair queueing in switched ethernet networks for time critical applications," in *19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, April 2005, pp. 141–141.
- [24] S. S. Craciunas and R. S. Oliver, "Smt-based task- and network-level static schedule generation for time-triggered networked systems," in *Proceedings of the 22Nd International Conference on Real-Time Networks and Systems*, ser. RTNS '14. New York, NY, USA: ACM, 2014, pp. 45:45–45:54. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2659787.2659812>
- [25] "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks Corrigendum 1: Technical and Editorial Corrections," *IEEE Std 802.1AS-2011/Cor 1-2013 (Corrigendum to IEEE Std 802.1AS-2011)*, pp. 1–128, Sept 2013.
- [26] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 14: Stream Reservation Protocol (SRP)," *IEEE Std 802.1Qat-2010 (Revision of IEEE Std 802.1Q-2005)*, pp. 1–119, Sept 2010.
- [27] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 12: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams," *IEEE Std 802.1Qav-2009 (Amendment to IEEE Std 802.1Q-2005)*, pp. C1–72, Jan 2009.
- [28] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Frame Replication and Elimination for Reliability (Draft)," 2017.
- [29] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks Amendment: Path Control and Reservation," 2015.
- [30] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks Amendment: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements (Draft)," 2017.
- [31] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks Amendment: Enhancements for Scheduled Traffic," 2015.
- [32] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks - Amendment: Frame Preemption," 2015.
- [33] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks Amendment: Enhancements and performance improvements (Draft)," 2015.

BIBLIOGRAPHIE

- [34] J. Song, S. Han, A. Mok, D. Chen, M. Lucas, and M. Nixon, “Wirelesshart: Applying wireless technology in real-time industrial process control,” in *Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2008. RTAS '08. IEEE*, April 2008, pp. 377–386.
- [35] S. Petersen and S. Carlsen, “Wirelesshart versus isa100.11a: The format war hits the factory floor,” *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 5, no. 4, pp. 23–34, Dec 2011.
- [36] I. C. S. L. M. S. Committee *et al.*, “Ieee std 802.11g, ieee standard for local and metropolitan area networks—specific requirements part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment 4: Further higher data rate extension in the 2.4 ghz band.” 2003.
- [37] T. Saeki, “Orthogonal frequency division multiplexing,” Sep. 21 1999, uS Patent 5,956,318. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US5956318>
- [38] J. Avery, W. Cooper, K. Nelson, and D. Jones, “Frequency hopping spread spectrum data communications system,” Feb. 15 1994, uS Patent 5,287,384. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US5287384>
- [39] G. Vannucci, “Direct sequence spread spectrum (dsss) communications system with frequency modulation utilized to achieve spectral spreading,” Sep. 22 1992, uS Patent 5,150,377. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US5150377>
- [40] M. B. Pursley, T. C. Royster, and M. Y. Tan, “High-rate direct-sequence spread spectrum,” in *IEEE Military Communications Conference, 2003. MILCOM 2003.*, vol. 2, Oct 2003, pp. 1101–1106 Vol.2.
- [41] G. Bianchi, “Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, March 2000.
- [42] I. C. S. L. M. S. Committee *et al.*, “Ieee std 802.11b, ieee standard for local and metropolitan area networks—specific requirements part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment 2: Higher-speed physical layer extension in the 2.4 ghz band,” 1999.
- [43] J. Hui and M. Devetsikiotis, “A unified model for the performance analysis of ieee 802.11e edca,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, no. 9, pp. 1498–1510, Sept 2005.
- [44] S. Bluetooth, “Specification of the bluetooth system—core, version 1.0 b volume 1, 1999. part e.”
- [45] S. T, M. Herceg, and T. Matic, “A simple signal shaper for gmsk/gfsk and msk modulator based on sigma-delta look-up table,” 06 2009.

- [46] R. Harish and L. S. Jyothi, "Design and verification of flexray to can protocol converter node," in *Proceedings of the CUBE International Information Technology Conference*, ser. CUBE '12. New York, NY, USA: ACM, 2012, pp. 192–197. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2381716.2381753>
- [47] B. Somers, "Investigation of a flexray-can gateway in the implementation of vehicle speed control," Ph.D. dissertation, Waterford Institute of Technology, 2009.
- [48] H. Ayed, "Analysis and optimization of heterogeneous avionics networks," Ph.D. dissertation, November 2014. [Online]. Available: <http://oatao.univ-toulouse.fr/13321/>
- [49] J.-L. Scharbarg, M. Boyer, and C. Fraboul, "Interconnecting can busses via an ethernet backbone," in *Fieldbus Systems and Their Applications 2005*, M. L. Chávez, Ed. Oxford: Elsevier, 2006, pp. 206–213. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080453644500691>
- [50] F. De Pellegrini, D. Miorandi, S. Vitturi, and A. Zanella, "On the use of wireless networks at low level of factory automation systems," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 2, no. 2, pp. 129–143, May 2006.
- [51] T. Sauter, J. Jasperneite, and L. Lo Bello, "Towards new hybrid networks for industrial automation," in *Emerging Technologies Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on*, Sept 2009, pp. 1–8.
- [52] A. Willig, K. Matheus, and A. Wolisz, "Wireless technology in industrial networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1130–1151, June 2005.
- [53] R. Costa, P. Portugal, F. Vasques, and R. Moraes, "Comparing rt-wifi and hcca approaches to handle real-time traffic in open communication environments," in *Emerging Technologies Factory Automation (ETFA), 2012 IEEE 17th Conference on*, Sept 2012, pp. 1–8.
- [54] R. V. Jr., L. A. Guedes, F. Vasques, P. Portugal, and R. Moraes, "A new mac scheme specifically suited for real-time industrial communication based on ieee 802.11e," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 39, no. 6, pp. 1684–1704, 2013, special Issue on Wireless Systems: Modeling, Monitoring, Transmission, Performance Evaluation and Optimization. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790612001929>
- [55] W. L. Ng, C. K. Ng, N. Noordin, and B. Ali, "Performance analysis of wireless control area network (wcan) using token frame scheme," in *Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2012 Third International Conference on*, Feb 2012, pp. 695–699.
- [56] N. Pereira, B. Andersson, and E. Tovar, "Widom: A dominance protocol for wireless medium access," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 2, pp. 120–130, May 2007.

BIBLIOGRAPHIE

- [57] A. Varga and R. Hornig, “An overview of the omnet++ simulation environment,” in *Simutools '08*. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008, pp. 1–10.
- [58] R. Davis, A. Burns, R. Bril, and J. Lukkien, “Controller area network (can) schedulability analysis: Refuted, revisited and revised,” *Real-Time Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 239–272.

Résumé

La gestion des communications dans les systèmes embarqués avioniques ou automobiles devient de plus en plus complexe à mettre en œuvre dans un contexte où les contraintes temporelles et environnementales sont très fortes et le taux d'échanges de messages est en continuelle augmentation. L'introduction de l'hétérogénéité des réseaux dans ce contexte permet de lever cette complexité en apportant un gain non négligeable en bande passante et en poids pour des coûts de développements relativement faibles. Nous nous intéressons dans cette thèse aux réseaux embarqués hétérogènes et plus précisément aux passerelles d'interconnexion des différentes technologies réseaux considérées. Nous proposons différentes stratégies d'interconnexion, puis, nous présentons deux études de cas basées sur des architectures réseaux interconnectant plusieurs bus CAN via des réseaux fédérateurs différents. Nous montrons sur ces architectures réseaux, l'impact des différentes passerelles sur les délais des différents flux du réseau.

Mots clés : Architectures réseaux hétérogènes, Réseaux temps-réel embarqués, Passerelles, CAN, Ethernet, WiFi, Capteurs, Encapsulation

Abstract

The management of communications in avionics or automotive embedded systems becomes increasingly complex to implement in a context where temporal and environmental constraints are very strong and the messages exchange rate is continually increasing. The introduction of the heterogeneity concept in this context allows to bypass this complexity by providing a non-negligible gain in bandwidth and weight for a relatively low development cost. This thesis addresses the concept of the heterogeneous embedded networks, more precisely, we target the interconnection gateways of the different network technologies we have considered. We propose several interconnection strategies and then present two case studies based on a network topology that interconnects several CAN buses via different backbone networks. We show on these network architectures, the impact of the different proposed gateways on the different network flow delays.

Keywords: Heterogeneous network architectures, Real-time embedded networks, Gateways, CAN, Ethernet, WiFi, Sensors, Encapsulation