



**HAL**  
open science

## Etude Comparative EtherCAT vs Bus Capteurs

Yannick Wasilewski

► **To cite this version:**

Yannick Wasilewski. Etude Comparative EtherCAT vs Bus Capteurs. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2011. hal-01876956

**HAL Id: hal-01876956**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01876956>**

Submitted on 19 Sep 2018

**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.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**Université Henri Poincaré, Nancy I**  
**Faculté des Sciences et Technologies**

**Master Ingénierie de Systèmes Complexes**

**Spécialité « Réseaux Signaux et images »**

**Année universitaire 2010-2011**

**Etude Comparative EtherCAT vs Bus**  
**Capteurs**

**Mémoire présenté par « WASILEWSKI Yannick »**

**Soutenu le vendredi 09 septembre 2011**

**Stage effectué à ZODIAC DATE SYSTEMS**

**Z.A. de Courtaboeuf**

**5 Avenue des Andes**

**CS90101**

**91978 COURTABOEUF Cedex**

**Tuteur industriel : ZENIER Vincent**

**Tuteur universitaire : GEORGES Jean Philippe**

## PREAMBULE

Dans le cadre de la formation du Master Ingénierie des Systèmes Complexes spécialité Réseaux, Signaux et Images, ce rapport vient conclure un stage de 5 mois au sein de l'entreprise Zodiac Data Systems. Il a pour objectif de démontrer mes compétences techniques et théoriques employées durant ce stage et ce qu'elles ont apportées à l'entreprise.

Après une phase préliminaire qui a eu lieu d'Octobre 2010 à Février 2011 dans les locaux du CRAN à NANCY dans laquelle l'objectif était une prise d'information sur le principe d'EtherCAT et qui se conclut par la rédaction d'une synthèse qui apporta une clarification sur les différentes questions posées par ZODIAC DATA SYSTEMS, la seconde phase se déroula aux ULIS (91) au sein de l'entreprise ZDS dans le service Bureau d'Etudes.

Lors de ces 5 mois, ma mission consistait en une étude comparative d'EtherCAT vis-à-vis du principe du Bus Capteurs de relever les mécanismes ou fonctions qui pourraient être portés sur le système Bus Capteurs. Une seconde mission m'a également été confiée dans laquelle je devais étudier les principes de synchronisations IEEE 1588, Distributed Clock ainsi que celui utilisé dans le système Bus Capteurs.

Ce stage m'a permis d'approfondir mes connaissances vis-à-vis du principe EtherCAT et de découvrir un autre réseau de terrain appelé système Bus Capteurs. J'ai également pu découvrir toutes les exigences nécessaires à la conception d'un réseau de terrain et m'adapter aux méthodes de travail de l'entreprise.

## REMERCIEMENTS

Je souhaiterais avant tout remercier l'entreprise ZODIAC DATA SYSTEMS de m'avoir accueilli afin que je puisse effectuer mon stage de fin d'étude de master Ingénierie des Systèmes Complexes spécialité Réseaux, Signaux et Images.

Je remercie vivement Mr Vincent ZENIER mon maître de stage ainsi que Mr Hervé COSTA qui m'ont conseillé et suivi tout au long du stage et qui ont fait preuve de disponibilité à mon égard dans les moments difficiles.

Je tiens également à remercier Mr Ewan BESSONNEAU qui m'a apporté son aide ainsi que mon tuteur universitaire Mr Jean-Philippe GEORGES pour avoir accepté de me suivre durant ces 5 mois et pour sa disponibilité.

Une pensée particulière à toutes les personnes du bureau d'études des ULIS pour leur accueil chaleureux et leur gentillesse ainsi qu'à l'ensemble des personnes que j'ai côtoyées lors de ce stage chez ZODIAC DATA SYSTEMS.

# SOMMAIRE

PREAMBULE .....	2
REMERCIEMENTS .....	3
SOMMAIRE .....	4
LISTE DES FIGURES .....	5
LISTE DES ANNEXES .....	5
GLOSSAIRE.....	6
PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ZODIAC DATA SYSTEMS.....	7
ORGANISATION GENERALE .....	7
ZODIAC DATA SYSTEMS.....	8
DIVISION TELEMESURE ET TELECOMMUNICATION .....	9
HISTORIQUE .....	10
PRESENTATION DE LA MISSION .....	11
INTRODUCTION.....	11
SITUATION PAR RAPPORT A LA FORMATION .....	12
GESTION DU STAGE ET CAHIER DES CHARGES.....	13
GESTION DU STAGE .....	13
CAHIER DES CHARGES .....	14
DEMARCHE EMPLOYEE ET MISE EN FORME DU DOCUMENT .....	15
DEMARCHE EMPLOYEE.....	15
MISE EN FORME DU DOCUMENT .....	15
PREMIERE PARTIE : ETUDE COMPARATIVE D'ETHERCAT VIS-A-VIS DU SYSTEME BUS CAPTEURS.....	16
MOYEN MIS A DISPOSITION .....	16
ETUDE COMPARATIVE .....	22
SECONDE PARTIE : PROTOCOLES DE SYNCHRONISATION .....	31
MOYEN MIS A DISPOSITION .....	31
ETUDE COMPARATIVE .....	32
SYNTHESE.....	33
BIBLIOGRAPHIE.....	34
ANNEXES .....	35

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : ENTREPRISE ZODIAC DATA SYSTEMS .....	8
FIGURE 2 : SITES ET LIGNE DE PRODUITS .....	9
FIGURE 3 : ARCHITECTURE DU BUS CAPTEURS .....	17
FIGURE 4 : MAQUETTE DU BUS CAPTEURS .....	20
FIGURE 5 : ARCHITECTURE DU BUS CAPTEURS VS ETHERCAT .....	24

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : PLANNING FINAL .....	35
ANNEXE 2 : DEBITS ETHERCAT VS BUS CAPTEURS .....	36
ANNEXE 3 : ETUDE THEORIQUE « DECOUVERTE TOPOLOGIQUE » .....	37
ANNEXE 4 : MODULE $\mu$ CAT A 3 INTERFACES ETHERNET .....	40
ANNEXE 5 : FIABILITE : ALGORITHME D'ARBITRAGE ET MODULE $\mu$ CAT .....	41

## 1. GLOSSAIRE

<b>Broadcast</b>	Une transmission sans accusé de réception à un nombre indéterminé de récepteurs.
<b>Cat</b>	Category – classification des câbles utilisés sur Ethernet. Cat5 est le minimum requis pour EtherCAT. Cependant, Cat6 et Cat7 peuvent être utilisés.
<b>DC</b>	Distributed Clocks : Mécanisme d'horloges distribuées pour synchroniser le maître et les esclaves EtherCAT.
<b>EBUS</b>	Basé sur LVDS (Low Voltage Differential Signaling) standard spécifié sur ANSI/TIA/EIA-644-1995.
<b>EtherCAT</b>	Ethernet Control Automation Technology. Standard temps réel pour les réseaux industriels.
<b>EtherType</b>	Ce champ est codé sur 2 octets et indique le type de protocole inséré dans le champ donnée.
<b>FPGA</b>	Field Programmable Gate Array: Circuit logique programmable.
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<b>ISO/OSI Model</b>	Mis en place par L'organisme l'ISO en 1984, cette norme permet d'assurer une communication universelle entre les ordinateurs
<b>MAC</b>	Media Access Control: Spécifie l'accès de la station au medium de communication.
<b>MII</b>	Media Independent Interface: Interface normalisée indépendante du support entre la couche MAC Ethernet et la couche physique.
<b>Protocole</b>	Un protocole est un ensemble de règles qui définissent un langage afin de faire communiquer plusieurs ordinateurs.
<b>QoS</b>	Quality of Service.
<b>ZDS</b>	ZODIAC DATA SYSTEMS.



## 2. PRESENTATION DE ZODIAC DATA SYSTEMS

### 2.1 ORGANISATION GENERALE:

Zodiac s'est dirigé vers l'aéronautique en 1896 avec le développement des ballons dirigeables et des avions. La société a réussi à prendre son essor dans les années 1930 avec l'invention du concept du bateau pneumatique. Grâce à cette idée, le Groupe a imposé son image de marque après la seconde guerre mondiale.

De nos jours, la société s'est recentré sur l'aéronautique après la cession de ses activités Marine en septembre 2007.

Les savoir-faire technologiques de Zodiac sont organisés en trois métiers principaux qui sont :

- Les équipements de sécurité.
- Les systèmes embarqués.
- Les intérieurs de cabines.

Eux même se déclinant en six branches d'activités.

L'ensemble des activités de Zodiac regroupe près de 20 000 personnes dans le monde contribuant au développement et à la croissance du Groupe. Le Groupe compte environs 77 sites de productions répartis un peu partout dans le monde ainsi que d'une branche d'activité entièrement dédiée au service et au support clients avec 16 centres d'opérations.

Le trois quart de ses effectifs sont basés en dehors de la France ainsi ZODIAC bénéficie d'un esprit d'ouverture internationale qui lui permet de mieux appréhender les attentes des marchés. Les implantations industrielles du Groupe se concentrent à proximité des principaux constructeurs aéronautiques afin d'offrir le meilleur service et de rester réactif.

## 2.2 ZODIAC DATA SYSTEMS:

ZODIAC DATA SYSTEMS constitue la division Télémétrie et Télécommunications de la branche Aerosafety & Technology au sein du groupe Zodiac Aerospace. La division est également composée des filiales installées en Allemagne, aux USA et en Grande Bretagne.



Figure 1 : Entreprise ZODIAC DATA SYSTEMS

Directeur général:	Christian NOVELLA
Directeur de division:	Jérôme RAME
Capital:	15 746 730 €
Nombre d'employés:	Environs 420 personnes.
Adresse:	5 Avenue des Andes, BP 101, 91940 Les Ulis.
Téléphone:	+33 1 69 82 78 00
Télécopie:	+33 1 69 07 39 50
Sites :	4 sites : - Siège social : ZDS Paris-Canada - Autres établissements : ZDS Paris-Andes ZDS Normandie ZDS Aquitaine
Site Internet:	<a href="http://www.zds-fr.com">www.zds-fr.com</a>

L'entreprise conçoit et réalise des produits essentiellement dans quatre domaines d'activités :

- Des systèmes de transmissions-télécommunications.
- Des stations de télémétries.
- Des systèmes d'acquisition et de restitution de télémétries embarquées.
- Des enregistreurs de mission (données et vidéo) et station sol (débriefing).

## 2.3 DIVISION TELEMESURE ET TELECOMMUNICATIONS:

La division Télémessure et Télécommunication offre une gamme complète de produits et solutions dans les domaines de la télémessure bord et sol, l'enregistrement de données d'essai et de mission, de commande-contrôle de satellites, de réception de données de satellites d'observation et de solutions pour le contrôle de la qualité des liaisons satellites.

La synergie des compétences en radio-fréquence et micro-ondes, techniques de modulation, traitement du signal, DSP & FPGA lui permet d'offrir une gamme étendue des produits à la pointe de l'innovation technologique dans les secteurs de l'aéronautique, de la défense, du spatial et de l'industrie.

ZODIAC DATA SYSTEMS SAS regroupe 3 Business Unit (BU) et 6 lignes de produits réparties dans ses 4 sites :

BUSINESS UNITS	LIGNES DE PRODUITS	SITES
TELECOMS	- Essais sol de défense - Radios & logiciels de station	Normandie
TELEMESURE	- Equipements embarqués - Station équipements - Station systèmes	Paris - Andes Aquitaine
AERO & DEFENSE	- Système d'acquisition de stockage et de traitement de données	Paris-Canada

Figure 2 : Sites et lignes de produits

Cette division, forte de ses quarante ans d'expérience dans la télémessure d'essais, fournit des produits ou des solutions complètes sur la totalité de la chaîne de télémessure, depuis les capteurs jusqu'au système de restitution des données.

Ses produits sont adaptés aux lanceurs spatiaux, aux missiles tactiques, aux avions de lignes, aux avions de combats ainsi qu'aux hélicoptères.

C'est au sein de cette division, que les équipements destinés à ARIANE sont étudiés, développés puis fabriqués et testés.

## 2.4 Historique:

- 1962** Création du Groupe INTERTECHNIQUE à l'origine des activités aérospatiales françaises et européennes.
- 1971** SNEC (Société Nouvelle d'Equipements du Calvados), se spécialise dans les techniques d'hyperfréquences appliquées aux transmissions et mesures ainsi qu'aux télécommunications.
- 1993** IN-SNEC est créée par la fusion du département « Télémessure et Systèmes » du Groupe INTERTECHNIQUE avec la Société SNEC.
- 1999** Le Groupe ZODIAC acquiert le Groupe INTERTECHNIQUE.
- 01/2001** Les activités d'E2A (filiale), située en Aquitaine, sont intégrées à la société IN-SNEC.
- 04/2002** La société IN-SNEC acquiert l'activité « enregistreurs d'essais » de THALES – ex « RACAL HEIM » - basée à la fois en Allemagne (Thales-Heim Systems GmbH) et aux Etats-Unis (Thales-Heim Data Systems). Ces deux filiales s'intitulent désormais Heim Systems GmbH et Heim Data Systems.
- 04/2006** La société IN-SNEC acquiert la société ENERTEC (ancienne division « Enregistrement Magnétique et Acquisition de Mesures ») de Schlumberger industries et ses deux filiales, ENERTEC US aux Etats-Unis et ENERTEC UK en Grande Bretagne, spécialisées dans l'activité « enregistreurs de données et vidéo ».
- 09/2006** Le Groupe IN-SNEC s'implante aux Etats-Unis avec la création de sa filiale ZODIAC DATA SYSTEMS (ZDS Inc.), qui résulte de la fusion d'ENERTEC America et Heim Data Systems (HDS Inc.).
- 01/2009** **ZODIAC DATA SYSTEMS SAS** est créée par la fusion des Sociétés IN-SNEC et ENERTEC. HEIM change de raison sociale pour devenir ZODIAC DATA SYSTEMS GmbH.

## 3. PRESENTATION DE LA MISSION

### 3.1 INTRODUCTION:

Dans le cadre de ses activités Etudes Amonts, ZODIAC DATA SYSTEMS développe un nouveau bus de communication destiné à des applications de télémesure Lanceurs.

Après un retour d'expérience provenant d'Ariane 5 faisant apparaître un coût élevé d'assemblage, d'intégration et de test lié au câblage sur l'actuel SSTM, l'étude réalisée par ZDS conduit à un nouveau bus de communication plus versatile. Ce bus de communication aussi appelé système Bus Capteurs est destiné à être installé dans la partie haute des lanceurs d'Ariane afin de récupérer des données issues de capteurs.

Cette télémesure possède deux grandes fonctions qui sont :

- Le contrôle visuel immédiat dans lequel les données extraites de la chaîne de télémesure sont utilisées pour contrôler en temps réel le comportement du lanceur ainsi que le déroulement de la séquence des événements.
- Le contrôle visuel différé dans lequel l'ensemble des données est transmis au Centre de Traitement Temps Différé de Toulouse, qui va reconstituer le vol complet et injecter ces données en tant que référence dans une base de données pour une exploitation future par Arianespace.

Par la suite, il s'avère que ce Bus Capteurs ait de grandes similitudes avec un réseau appelé EtherCAT en cours de normalisation.

Ainsi la mission que j'ai effectuée au sein de l'entreprise ZODIAC DATA SYSTEMS se décomposait essentiellement en deux grandes parties. La première qui est une étude comparative à proprement parlé, dans laquelle je devais comparer les performances de deux systèmes (EtherCAT et le système Bus Capteurs) et la seconde une étude de protocole de synchronisation tel que Distributed Clock, IEEE 1588 ainsi que le protocole de synchronisation utilisé sur le système Bus Capteurs.

L'objectif de ces études est de voir lequel de ces protocoles est le plus performant et le mieux adapté pour le nouveau bus de communication et quels éléments pourraient être portés sur celui-ci afin de l'améliorer voir le simplifier. Car le but recherché par ZODIAC DATA SYSTEMS est d'avoir un bus de communication simple à mettre en œuvre et à installer tout en étant le plus performant et fiable possible.

### 3.2 SITUATION PAR RAPPORT A LA FORMATION:

Ce stage se positionne sur l'étude des réseaux de terrain utilisant le protocole Ethernet et fonctionnant sur le principe maître-esclaves. Grâce à celui-ci, j'ai pu accroître mes connaissances sur le sujet et adopter une vision « d'entreprise » afin de comprendre les paramètres et performances recherchés par ceux-ci. Ainsi ce stage se positionne dans la lignée de mes études des réseaux informatiques.

Durant ma formation de master Ingénierie des Systèmes Complexes, j'ai pu acquérir les connaissances théoriques nécessaires sur les réseaux de terrain, sur Ethernet et ce qui rassemble les réseaux en général, tandis que durant le stage, j'ai pu utiliser ces connaissances afin de comprendre le fonctionnement d'EtherCAT et le système Bus Capteurs. Mes connaissances m'ont bien servi pour la comparaison des performances des deux systèmes et tout ce qui se rapporte à la QoS.

Le fait d'avoir étudié le protocole EtherCAT durant mes années de Master et notamment lors du projet effectué en Master 2 (sujet proposé par ZDS), m'a également fait gagner des heures précieuses sur le stage, car je connaissais déjà son principe de fonctionnement ainsi que certaines caractéristiques.

Cette compréhension était nécessaire pour la suite du stage dans lequel je devais identifier les fonctions ou protocoles qui pouvaient être portés sur le système Bus Capteurs pour l'améliorer.

Les différentes connaissances tant sur les bases scientifiques (physique, mathématique) qu'en informatique industrielle (réseaux industrielles, télécommunications, automatique) acquis durant mes études m'ont permis de mener à bien des études théoriques nécessaires à l'étude comparative notamment pour les calculs de débits ou encore les calculs sur le temps nécessaire au protocole de découverte topologique pour découvrir l'ensemble des équipements.

Les connaissances sur la gestion de projet acquis pendant mes années de Master m'ont énormément servi pour la gestion du stage et ainsi permettre le bon déroulement de celui-ci.

### **3.3 GESTION DU STAGE ET CAHIER DES CHARGES :**

#### **3.3.1 Gestion du stage :**

Afin de mener à bien le stage, une réunion a été effectuée lors de la première semaine avec le maître de stage pour décomposer celui-ci en plusieurs parties pour bien poser les objectifs et partir sur des bases saines.

Une fois que le problème a bien été posé, nous avons découpé le projet en entités simples puis identifié et décrit clairement les différentes tâches à réaliser.

Les tâches bien définies, il ne restait plus qu'à les planifier.

Pour cela, nous avons estimé le temps nécessaire à la réalisation de celles-ci et élaboré un planning prévisionnel qui servira de référence pour suivre et contrôler l'état d'avancement du stage.

Afin de ne pas s'éloigner du sujet de stage et pour vérifier et valider les différentes tâches, nous avons également prévu des points de contrôles (ou jalons) dans le planning qui sont en réalité des réunions avec mes maîtres de stage dans lesquelles je présentais l'étude en cours et les conclusions que j'en avais tirées. D'autres points-clés y figurent également tel que le début et la fin du stage ainsi que la visite du tuteur universitaire.

Ainsi grâce à ce planning je pouvais savoir si j'étais dans les temps ou en retard et dans le cas échéant rectifier le tir.

Le planning du stage a été décomposé en deux grandes parties :

- La partie Management de Stage : qui regroupe les différentes revues effectuées tout au long du stage ainsi que les grandes dates du stage tels que le début, la fin et la visite du tuteur industriel sur le lieu du stage.
- La partie Etude Comparative et réalisation du rapport (Stage EtherCAT) : qui regroupe les différentes études comparatives avec leur temps alloué et leur date d'échéance ainsi que la rédaction du rapport stage.

Une modélisation du planning final est présente dans l'Annexe 1 à la fin de ce document.

### 3.3.2 Cahier des Charges :

Le stage est une étude comparative du principe EtherCAT vis-à-vis du Bus Capteurs créé par ZDS. Il devra permettre d'identifier les apports potentiels du standard EtherCAT et d'en évaluer la portabilité. Celui-ci est décomposé en plusieurs grands objectifs dont les tâches seront décrites et analysées en détail dans la suite de ce document.

- Etude du Bus Capteurs
- Etude comparative
  - o Comparaison des performances système
  - o Simplicité de la mise en œuvre
  - o Versatilité et fiabilité du système
  - o Complexité des éléments du système
  - o Portage d'EtherCAT sur l'infrastructure Bus Capteurs
    - Identification des éléments à porter
    - Impact sur l'architecture
- Synchronisation
  - o Description des protocoles de synchronisation EtherCAT / IEEE1588
  - o Portage sur le Bus Capteurs
    - Description de la solution de synchronisation
    - Impact sur l'architecture
- Rapport de stage

Afin de ne pas être débordé à la fin du stage, il a été décidé que la rédaction du rapport de stage s'effectue au fur et à mesure des études. Ainsi pour chaque étude comparative et avant de passer à la suivante, un document synthèse devait être rédigé puis corrigé par le maître de stage.

Une fois ce document vérifié et validé, il était possible de commencer l'étude suivante. Même si en réalité, à cause de l'emploi du temps chargé de mon maître de stage, il arrivait de temps en temps de passer à une autre étude sans avoir validé la précédente et y revenir un peu plus tard durant le stage.



## 3.4 Démarche employée et mise en forme du document :

### 3.4.1 Démarche employée :

Dans un premier temps je devais lire et comprendre les documents relatifs au système Bus Capteurs (cf. moyens mis à disposition) afin de pouvoir effectuer ces études. D'ailleurs, pour voir si j'avais bien compris le principe du système Bus Capteurs, il m'a été demandé de faire une présentation sous forme powerpoint devant le maître de stage et l'approbateur.

Une fois le principe assimilé je pouvais attaquer l'étude et traiter les différents points concernant la partie du Bus Capteurs. Une fois cette partie traitée, elle a été vérifiée et validée par mon maître de stage.

Ensuite je pouvais commencer la partie sur EtherCAT. L'étude débutait par une recherche documentaire sur Internet et notamment sur le site du constructeur Beckhoff pour récolter le maximum d'informations possible sur les caractéristiques, le fonctionnement et les performances d'EtherCAT. Le plus dur étant de trouver des informations précises sur celui-ci. Une fois la partie validée, celle-ci était vérifiée et validée tout comme la partie sur le Bus Capteurs. Il ne restait plus qu'à comparer les performances et caractéristiques des deux systèmes, de voir lequel était le meilleur et comment le système Bus Capteurs pouvait être amélioré.

### 3.4.2 Mise en forme du document :

Cette étude se présente sous la forme d'un document dont la logique de conception est décrite ci-dessous.

Pour chaque étude comparative le document est décomposé en quatre parties :

- L'introduction : qui récapitule les différents points que l'on va traiter et analyser dans l'étude.
- La partie sur le Bus Capteurs: qui est l'étude consacrée au système Bus Capteurs dans laquelle les points précédemment cités seront analysés.
- La partie sur EtherCAT : qui est l'étude consacrée à EtherCAT dans laquelle les points précédemment cités seront traités.
- Le tableau récapitulatif : qui regroupe toutes les performances de chacun des deux systèmes afin d'avoir un point de vue plus précis.

En ce qui concerne les parties « Portage d'EtherCAT sur l'infrastructure Bus Capteurs », la mise en forme n'est plus tout à fait la même car dans un premier temps, on va présenter les différents éléments que l'on va porter sur le Bus Capteurs sous forme d'un tableau qui regroupe les avantages proposés par EtherCAT et les éléments à porter puis ensuite les décrire.

Pour chaque élément nous allons décrire :  
- Les apports d'EtherCAT.  
- Les intérêts pour le Bus Capteurs.  
- Les impacts sur l'architecture du Bus Capteurs.

## **3.5 PREMIERE PARTIE: ETUDE COMPARATIVE D'ETHERCAT VIS-A-VIS DU SYSTEME BUS CAPTEURS.**

La première partie consistait à comparer les performances du système Bus Capteurs à celles d'EtherCAT afin de voir lequel des deux est le plus performant.

### **3.5.1 Moyens mis à disposition :**

Avant de commencer cette étude, une compréhension du principe de fonctionnement du système Bus Capteurs est nécessaire. Ainsi les deux premières semaines étaient consacrées à une prise d'informations sur le fonctionnement de celui-ci et à sa compréhension.

Pour ce faire l'étude de plusieurs documents était nécessaire.

#### **Document « Spécifications d'Interfaces du Bus Capteurs » :**

Dans un premier temps l'analyse de la spécification d'interface du système Bus Capteurs qui définit le nouveau bus développé par ZODIAC DATA SYSTEMS était nécessaire. Ce document regroupe les informations sur l'interface du Système Bus Capteurs, son architecture, le protocole de communication utilisé ainsi que le principe de distribution de son alimentation. Dans ce document nous retrouvons notamment les différents protocoles qui peuvent être utilisés sur le système tel que le protocole de supervision, d'acquisition de données, de découverte topologique ainsi que de réservation de la bande passante pour des points de collecte secondaire (équipement autre que le Bus Controller capable de générer des trames). L'architecture complète des différents équipements utilisés, le protocole de synchronisation, la datation des échantillons ainsi que les signaux utilisés y sont également décrits.

Ainsi toutes les informations nécessaires à la compréhension de son fonctionnement étaient réunies dans ce document.

Le Bus Capteurs est un bus sur lequel le protocole de communication, de mise en configuration ainsi que la distribution de l'énergie circulent sur le même support.

Architecture :

L'architecture du Bus Capteurs est un ensemble de boîtiers de jonctions préinstallés et espacés régulièrement par des câbles quatre paires torsadées. Les quatre paires sont distribuées de la manière suivante : une paire Instruction, une paire Horloge et deux paires Ethernet.

La paire Instruction est utilisée pour véhiculer les instructions nécessaires à la distribution de la date ainsi que les instructions gérant l'état des différents modules  $\mu$ CAT, la paire Horloge sur laquelle est distribuée une horloge unique de fréquence de 10 Mhz à l'ensemble des module tandis que les deux paires Ethernet (une paire pour chaque sens de transmission) permettent le transport des protocoles de communication (supervision, acquisition de données, découverte topologique, réservation de bande passante pour des points de collecte secondaires).

Cette architecture permet ainsi l'acheminement des informations et de la puissance vers les différents éléments présents sur le bus.

Comme expliqué précédemment, le système Bus Capteurs est composé de boîtiers de jonctions qui peuvent être vus comme des prises sur lesquelles viennent se plugger des modules  $\mu$ CAT permettant le conditionnement et l'alimentation des capteurs branchés dessus (maximum 2 capteurs par module  $\mu$ CAT). Ce système est commandé par un équipement qui peut être vu comme un maître de bus et qui est appelé Bus Controller. Celui-ci génère et distribue l'alimentation aux différents modules  $\mu$ CAT via les paires Horloge et Instruction et c'est lui qui génère également les trames transportant les divers protocoles sur la paire Ethernet.

Les modules  $\mu$ CAT quant à eux gèrent les interfaces de communications avec le système, la numérisation et la datation des échantillons provenant des capteurs. Les échantillons issus de ces capteurs sont au préalable mis en paquet avant d'être insérés à la volée dans des trames véhiculées sur le lien Ethernet.

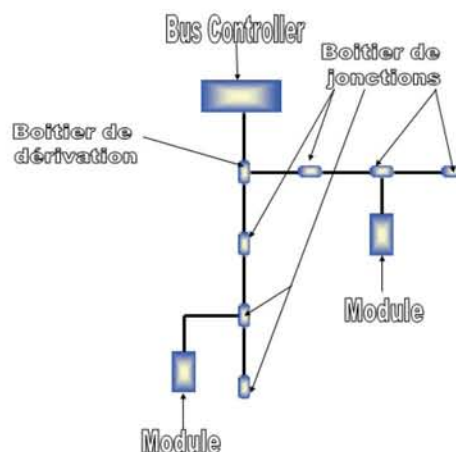


Figure 3 : Architecture du Bus Capteurs.

Principe de fonctionnement :

Dans un premier temps un anneau logique est créé sur le lien de communication Ethernet entre le Bus Controller et les modules  $\mu$ CAT via le protocole de découverte topologique. Ce protocole permet d'identifier les modules situés en extrémité de ligne pour les configurer en mode Loopback et ainsi boucler l'anneau logique. Cette découverte topologique est effectuée de proche en proche sur la paire Instruction et la paire Ethernet.

Une fois que l'anneau a été établi, le Bus Controller peut commencer à générer des trames transportant le protocole d'acquisition de données. La trame générée par le Bus Controller traverse les modules  $\mu$ CAT, est traitée à la volée par le module adressé (adressé via l'adresse MAC) puis lui est retournée grâce à une inversion de l'adresse MAC source et destination. Les modules qui ne sont pas adressés par la trame la laisse passer sans y apporter de modifications.

Ces trames peuvent transporter des données d'acquisition comme des données de supervision.

### **Document « Spécifications d'Interfaces du BUS PCM CANNES » :**

Etant donné que le système Bus Capteurs reprend une partie du fonctionnement du Bus PCM CANNES, notamment sur la paire Instruction, ce document devait m'aider à mieux appréhender son fonctionnement. Il regroupe divers informations sur le Bus PCM CANNES notamment sur son architecture, son support de transmission, les caractéristiques de la transmission, les différents messages instruction et réponse véhiculés ainsi que les caractéristiques des signaux.

Le Bus PCM CANNES est une liaison numérique série utilisée dans les systèmes de télémessures d'engins balistiques.

Principe de fonctionnement :

Chaque bus comporte deux lignes : une ligne « instruction » dont les signaux sont initialement créés par l'unité centrale et la ligne « réponse » qui transporte les résultats de mesure en provenance des unités périphériques. Les instructions sont lues par toutes les unités mais seule celle adressée émet une réponse, les autres unités ne font que transmettre la trame sans la modifier (positionné en mode recopie).

## Document « Plan et procédure des tests de validation de la maquette Bus Capteurs » :

Ce document permet de justifier expérimentalement le respect des exigences de la Spécification d'Interface du Bus Capteurs ainsi que d'évaluer les marges de fonctionnement. Il définit et décrit les essais de validation à effectuer sur la maquette Bus Capteurs en suivant la logique d'essai suivante :

- Test de conformité de la couche physique : vérification de la conformité des exigences des interfaces d'entrées/sorties des modules ainsi que des caractéristiques des supports physiques utilisés.
- Tests fonctionnels : Vérification des aspects fonctionnels du système Bus Capteurs.
- Tests de performances du bus Capteurs : Evaluation des performances du système Bus Capteurs en termes de qualité de transmission et de précision de synchronisation de la datation.
- Dimensionnement des alimentations : Vérification des hypothèses de dimensionnement du principe de distribution de l'énergie.
- Impact de l'alimentation sur les performances du Bus Capteurs : Evaluation de l'impact de l'alimentation sur les performances du Bus Capteurs.

Ce document se base sur les résultats obtenus depuis la maquette du Bus Capteurs pour différentes configurations matérielles. Certains tests effectués sur la maquette pouvaient prendre plusieurs jours.

Ce document m'a bien été utile pour comprendre la manière dont les éléments fonctionnel du système Bus Capteurs ont été validés.

Les résultats issus des tests effectués sur la maquette m'ont également servis dans l'étude comparative notamment en ce qui concerne les latences introduites par les modules  $\mu$ CAT, les latences de l'anneau, les temps de réponses ainsi que les limites imposées par l'alimentation.

Ainsi sans ces résultats pratiques, certaines parties de l'étude n'auraient pas pu aboutir.

## Maquette du système Bus Capteurs :

Utilisé pour effectuer les tests définis et décrits dans le document « Plan et procédure des tests de validation de la maquette Bus Capteurs », les résultats pratiques obtenus servaient à vérifier si les exigences de la Spécification d'Interface du système Bus Capteurs étaient respectées.

Cette maquette pouvait également servir de démonstrateur afin que ZODIAC DATA SYSTEMS puisse présenter le système Bus Capteurs à ses clients et leur montrer comment celui-ci fonctionne ou encore être utilisé pour tester le comportement de celui-ci pour différentes configurations matérielles ou paramétrisation.

Montage de la maquette :



Figure 4 : Maquette du Bus Capteurs

La maquette est composée des éléments suivants :

- Un logiciel de contrôle et de monitoring (LCM) exécuté sur un micro-ordinateur de type PC équipé d'un système opérationnel 32-bits. Il est relié au module Bus Controller (Bus autonome) via une liaison USB/RS232, et permet d'avoir une interface Homme-Machine avec le système Bus Capteurs. Le LCM est un outil de configuration et de monitoring du système développé dans le cadre de la réalisation de la maquette Bus Capteurs, il ne fait pas partie de la définition à proprement parlé du système Bus Capteurs.

- Un contrôleur de Bus autonome avec une alimentation externe qui implémente les fonctions suivantes :
  - o Mécanisme de génération de trame Ethernet pilotable par le LCM.
  - o Mécanisme de génération d'instructions pilotable par le LCM.
  - o Collecte des informations de supervision consultable via le LCM.
  - o Protocole de découverte topologique.
- Des boîtiers de Jonction.
- Des câbles 4 paires torsadées avec des connecteurs D-SUB HD 26 contacts.
- Des modules  $\mu$ CAT alimentés par une alimentation externe implémentant les fonctions suivantes :
  - o Réception et retransmission des trames Ethernet.
  - o Réception et retransmission des instructions.
  - o Monitoring des interfaces Ethernet et ligne Instructions consultable via le LCM grâce au protocole de supervision.
  - o Protocole de restitution des données, de découverte topologique et de supervision.

### **Ordinateur possédant un accès à Internet :**

Il m'a été confié un ordinateur disposant d'un accès à Internet. Grâce à celui-ci j'ai pu faire des recherches complémentaires sur les réseaux de terrain ou encore avoir des informations nécessaires au bon déroulement des études.

Je pouvais également faire recherches supplémentaires sur le principe d'EtherCAT et sur le protocole de synchronisation IEEE 1588.

### 3.5.2 Etude comparative :

Une fois le fonctionnement du système Bus Capteurs et EtherCAT assimilé, la seconde phase pouvait débuter. Celle-ci consistait à comparer les performances d'EtherCAT avec celles du système Bus Capteurs. Cette phase a été divisée en plusieurs études : Comparaison des performances système, simplicité de la mise en œuvre, versatilité et fiabilité du système, complexité des éléments du système et limitation ainsi que le portage d'EtherCAT sur l'infrastructure Bus Capteurs.

#### **Comparaison des performances système:**

But de l'étude :

Cette étude a pour principal objectif de comparer les performances à proprement parlé des deux systèmes. Comme il est important d'avoir un système dont le niveau de qualité de service (QoS) est élevé, l'idée est de comparer plusieurs points clés des deux systèmes afin de voir lequel est le mieux adapté et le plus performant pour un environnement aéronautique.

Pour ce faire, nous avons étudié et comparé les différents débits (débits physiques et débits utiles) que l'on pouvait atteindre sur les deux systèmes, les latences provoquées par les équipements ainsi que les temps de réponse des deux systèmes afin de voir la réactivité de ceux-ci. Dans cette partie nous avons également comparé les précisions de synchronisation ainsi que la gestion de la bande passante des deux systèmes.

L'objectif étant d'évaluer l'efficacité des mécanismes de synchronisation ainsi que d'allocation de la bande passante de chaque système.

Afin de voir lequel des deux systèmes est le plus performant en termes de débit, une étude théorique a été menée sur plusieurs cas de configuration de flux.

Premier cas :

Dans le premier cas nous avons considéré un réseau de 50 équipements branchés dessus avec un trafic uniformément réparti, c'est-à-dire que nous envoyons 1 trame de 1518 octets pour chaque équipement (module  $\mu$ CAT et esclave EtherCAT). L'objectif de ce cas est de voir quel est le débit utile max que peut atteindre les équipements.



Second cas :

Dans ce cas, nous voulions voir quel était le débit max atteignable par un seul équipement. Pour ce faire nous avons configuré un trafic dont toutes les trames sont destinées à un seul équipement. Nous avons donc un trafic de 1023 trames de 1518 octets destiné à un seul équipement (1023 trames car c'est le nombre max de trames que l'on peut configurer dans le descripteur de trafic du système Bus Capteurs, et afin d'avoir un point de comparaison, nous avons appliqué cette limite à EtherCAT même si on peut configurer un trafic avec un plus grand nombre de trame sur celui-ci).

Troisième cas :

Ici on voulait déterminer le débit min atteignable par un équipement. Nous avons donc configuré un trafic de telle façon que l'équipement envoie une trame de 64 octets par seconde.

Quatrième cas :

Dans ce cas, l'objectif était de déterminer le débit max meilleur cas et pire cas que l'on peut atteindre par équipement.

Meilleur cas : c'est le débit utile qu'on obtient en utilisant le minimum de bande passante sur le lien.

Pire cas : c'est le débit utile qu'on obtient en utilisant le maximum de bande passante sur le lien.

Analyse des résultats :

Les débits que l'on peut atteindre avec le système Bus Capteurs et EtherCAT sont quasiment les mêmes (cf. Annexe 2), nous avons juste un petit avantage pour le système Bus Capteurs du fait qu'EtherCAT a de l'overhead supplémentaire provenant de la structure de son datagramme.

### Simplicité de mise en œuvre:

Etant donné que les équipements sont destinés à être installés dans un environnement de type lanceur et que les clients de ZODIAC DATA SYSTEMS recherchent un système versatile et simple à installer, cette étude va nous permettre de savoir lequel des deux systèmes entre le Bus Capteurs et EtherCAT est le mieux adapté pour ce type d'environnement.

Afin de mener à bien cette étude, nous l'avons divisé en deux grands groupes bien distincts : la simplicité de déploiement de l'infrastructure et la simplicité de mise en œuvre de chacun des deux systèmes.

- Simplicité de déploiement de l'infrastructure :

Ici on s'intéresse essentiellement à l'architecture du système, la facilité d'installation des équipements, la problématique de la gestion et la distribution de l'alimentation ainsi que le poids et la taille des équipements.

En étudiant leur architecture, nous avons pu découvrir les éléments qui constituaient les bus, leur fonctionnalité, leur type (équipement passif ou actif) ainsi que la manière dont ceux-ci étaient connectés entre eux. La facilité d'installation des équipements ainsi que leur poids nous renseignent sur les moyens disponibles pour fixer les éléments du système ainsi que les environnements avec lesquels ils peuvent être compatibles. Quant à la gestion et la distribution de l'alimentation, celle-ci nous indique si les éléments sont alimentés via une source externe ou si elle est distribuée sur le même support que les signaux de communication.

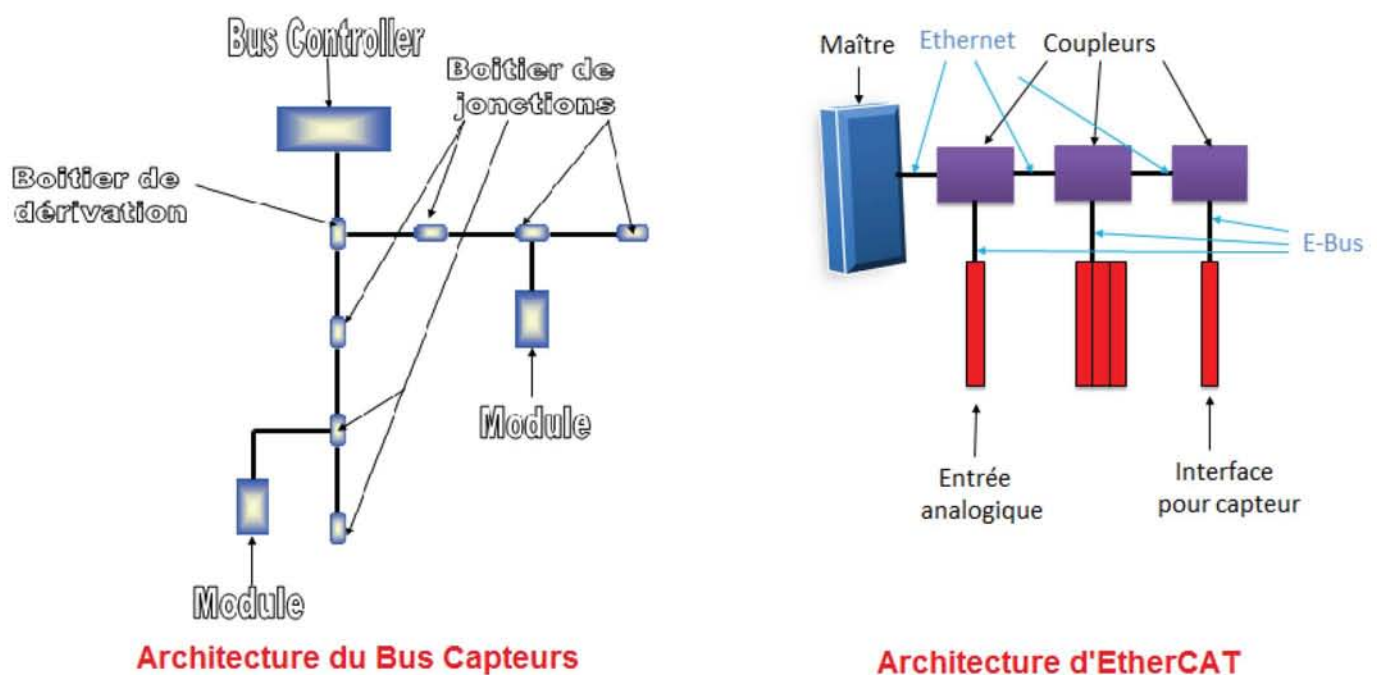


Figure 5 : Architecture du Bus Capteurs vs EtherCAT.

- Simplicité de mise en œuvre :

Dans la simplicité de mise en œuvre nous avons étudié la contrôlabilité, la facilité de configuration ainsi que les moyens de supervision disponibles pour les deux systèmes.

L'objectif de cette partie étant de voir par quel moyen il est possible de configurer ces deux réseaux de terrains et si les fonctions de mise en œuvre opérationnelle (outils de téléchargement et outils pour générer les fichiers de configuration du système) sont intégrées aux outils de mise en œuvre existant ou si l'utilisation d'un logiciel tiers se révèle nécessaire. Dans le cas où l'utilisation d'un logiciel est obligatoire, une description de celui-ci avec les paramètres de configuration est envisagée.

Précédemment nous avons parlé des fonctions de mise en œuvre opérationnelle, celles-ci doivent permettre de superviser et de paramétrer le bus.

Superviser le bus c'est, entre autre, contrôler l'état du système et de ses éléments, monitorer les performances de transmissions sur les interfaces de communication du système et vérifier la topologie.

**Versatilité et fiabilité du système :**

Dans l'aéronautique, il est primordial d'avoir des équipements dont le niveau de fiabilité est élevé pour minimiser tout risque de pannes, et dans le cas d'apparition d'un défaut, le système doit être capable de continuer à fonctionner avec un ou plusieurs équipements hors service. Ainsi nous allons étudier les performances des mécanismes de recouvrement utilisés pour fiabiliser le système et vérifier le temps qu'il leur faut pour que le système soit à nouveau opérationnel.

Pour ce faire, nous allons dans un premier temps décrire les différents principes proposés pour fiabiliser chacun des deux systèmes, puis étudier les modifications Hardware qu'elles impliquent à l'architecture des systèmes et finir sur le temps nécessaire au recouvrement du système.

Dans cette partie, on va également s'intéresser aux protocoles de découverte topologique de chacun des deux systèmes en détaillant les différentes étapes de celui-ci ainsi qu'en déterminant théoriquement le temps nécessaire aux deux systèmes pour découvrir tous les équipements présents sur leur bus, puis on va s'intéresser à son comportement en cas d'ajout ou de suppression d'un équipement.

Afin de déterminer le temps nécessaire au protocole de découverte topologique pour découvrir tous les équipements, je devais dans un premier temps chercher le principe de fonctionnement de ce protocole, puis les formats des trames échangés entre le maître et les esclaves (ou le Bus Controller et les modules  $\mu$ CAT), et enfin, faire l'étude théorique.

La démarche de l'étude théorique effectuée ainsi que les résultats obtenus sur le système Bus Capteurs sont définis dans l'Annexe 3.

### **Complexité des éléments du système et limitation:**

Dans la partie précédente nous avons parlé de fiabilité, et il faut savoir que l'électronique qui compose les équipements a un rôle important dans celle-ci. Les équipements réalisés par l'intermédiaire d'électronique simple sont plus fiable que des équipements réalisés via de l'électronique complexe.

Ainsi le but de cette partie est d'étudier les différents éléments qui composent les deux systèmes afin de voir quel système est le plus simple à mettre en œuvre.

On va dans un premier temps analyser et comparer les couches de protocoles requises pour le fonctionnement du système, ensuite on va s'intéresser aux éléments qui constituent le système et voir si l'utilisation d'un système d'exploitation ainsi que d'un microprocesseur est nécessaire, puis finir par les limitations imposées par ceux-ci.

Cette étude se conclut par une analyse des différentes limitations qui peuvent survenir sur le système comme les limitations en terme de nombre de nœuds ou encore de distance.

### **Portage d'EtherCAT sur l'infrastructure Bus Capteurs:**

But de l'étude :

Les études précédentes ont fait apparaître des éléments provenant d'EtherCAT qui pourraient être récupérés afin d'améliorer voir simplifier le système Bus Capteurs. Ces éléments peuvent être de nature physique autrement dit Hardware ou encore de nature fonctionnelle comme les protocoles utilisés ou son principe de fonctionnement.

Une fois que nous avons identifié les éléments intéressants qui peuvent être portés sur le Bus Capteurs, l'idée est de voir les impacts qu'impliquent ces éléments sur celui-ci et ainsi voir s'il est vraiment possible d'intégrer des fonctionnalités d'EtherCAT sur le système Bus Capteurs.

Dans la suite du document, nous allons présenter les éléments qui pourraient être portés sur le système Bus Capteurs avec leurs avantages et les impacts sur le système Bus Capteurs.

Eléments et fonctionnalités portés :

Latence des équipements :

- Avantage :

Les latences introduites par les esclaves EtherCAT sont plus faibles que celles introduites par les modules  $\mu$ CAT.

- Impact sur l'architecture du Bus Capteurs:

L'idée est d'optimiser la partie hardware (essentiellement le code FPGA) des modules  $\mu$ CAT ou encore une amélioration du mécanisme d'insertion des paquets à la volée dans la trame Ethernet afin de réduire ces latences.

Détection des équipements :

- Avantage :

Sur EtherCAT, ce sont les esclaves qui détectent les nouveaux équipements qui viennent se brancher sur le bus grâce à un signal provenant de leur interface MII, ainsi le système n'est pas obligé de redécouvrir tout l'anneau pour prendre en compte l'équipement qui vient d'être ajouté. Ceci permet une détection plus rapide que sur le système Bus Capteurs.

En intégrant ce moyen de détection, le système Bus Capteurs ne sera jamais mis hors service très longtemps (seulement le laps de temps nécessaire au module  $\mu$ CAT pour activer sa fonction loopback) et il ne sera plus obligé de refaire une découverte complète de l'anneau (relancer son protocole de découverte topologique), ce qui implique une diminution du temps de recouvrement de l'anneau.

Ce mécanisme peut également s'avérer très utile en ce qui concerne la fiabilité. C'est-à-dire si un équipement tombe en panne, le module  $\mu$ CAT en amont reboucle automatiquement l'anneau pour que le Bus Controller puisse continuer à communiquer avec les modules en amont du défaut.

- Impact sur l'architecture du Bus Capteurs:

Pour que les modules  $\mu$ CAT puissent découvrir automatiquement les équipements qui leur sont connectés dessus, une petite modification du code FPGA ainsi qu'une évolution de l'instruction Loopback étaient nécessaires.

Il faut programmer le FPGA pour que l'état du mode Loopback dépende de l'état de l'interface Ethernet :

- Si l'interface Ethernet du module  $\mu$ CAT est UP, le Loopback est OFF.
- Si l'interface Ethernet du module  $\mu$ CAT est DOWN, le Loopback est ON.

## Découverte topologique:

- Avantage :

Sur EtherCAT, l'anneau logique est créé par les esclaves via le principe de détection des liaisons puis le maître broadcast des trames pour configurer l'anneau. Lors de l'ajout d'un esclave, le maître ne reconfigure pas tout le réseau mais seulement le nouvel équipement impliquant une diminution du temps de reconfiguration de l'anneau non négligeable. Ainsi la capacité de reconfiguration de l'anneau est beaucoup plus efficace que celle du système Bus Capteurs et c'est cette fonctionnalité que nous allons intégrer au bus créé par ZODIAC DATA SYSTEMS.

- Impact sur l'architecture du Bus Capteurs:

J'ai proposé deux solutions pour que la fonctionnalité décrite ci-dessus puisse être intégrée sur le système Bus Capteurs.

La première dans laquelle l'anneau logique est établi par le Bus Controller et la seconde où l'anneau logique est établi par les modules  $\mu$ CAT.

Dans la première solution, cette découverte topologique s'effectue en 3 phases (Etablissement de l'anneau, Configuration des modes Loopback et vérification de l'anneau) et nécessite la création et l'utilisation de deux nouvelles trames (trame de détection de module  $\mu$ CAT et trame TDP-DU2) ainsi qu'une modification du code dans le FPGA du module  $\mu$ CAT. Il faut reprogrammer celui-ci pour qu'il n'intègre non plus une fonction de traitement dans le protocole de découverte topologique mais deux exclusifs qui seront sélectionnées en fonction de la valeur de l'Ethertype et du mode Loopback.

Dans la seconde solution, cette découverte topologique s'effectue en 2 phases (Vérification de l'anneau et Récupérations des adresses). Cette solution reprend les mêmes formats de trames définis ci-dessus.

## Extension de réseau:

- Avantage :

Les esclaves EtherCAT peuvent posséder jusqu'à 4 ports Ethernet ce qui simplifie grandement l'extension du réseau. L'idée est de créer des modules  $\mu$ CAT avec 3 interfaces Ethernet pour augmenter la simplicité d'extension du réseau et par la même occasion supprimer les boîtiers de dérivation. Supprimer les boîtiers de dérivation permet également une diminution du nombre total de module et par conséquent une baisse de coût et une augmentation de la fiabilité.

- Impact sur l'architecture du Bus Capteurs:

L'impact sur l'architecture du système Bus Capteurs est de nature Hardware avec une modification du module  $\mu$ CAT (ajout d'une troisième interface Ethernet : cf. Annexe 4) et de nature fonctionnelle avec une redéfinition du protocole de découverte topologique. Les autres éléments du système Bus Capteurs tels que le boîtier de jonction, le Bus Controller et les câbles ne changent pas.

Redondance de câble:

- Avantage :

La solution « redondance de câble » utilisé pour fiabiliser le système EtherCAT est intéressant pour le fonctionnement du système Bus Capteurs avec un module  $\mu$ CAT défaillant. Ainsi le Bus Controller pourra toujours communiquer avec les modules  $\mu$ CAT même si un défaut venait à se déclarer (excepté un défaut sur le Bus Controller).

- Impact sur l'architecture du Bus Capteurs:

Plusieurs modifications Hardware sont à prendre en compte notamment une modification du Bus Controller avec l'ajout d'une seconde interface Ethernet et une intégration d'une fonction d'arbitrage dont son algorithme aura pour fonction de choisir la trame traitée (cf : Annexe 5), une modification de l'architecture du module  $\mu$ CAT (le module  $\mu$ CAT devra être capable de traiter les trames dans les deux sens de communication : cf. Annexe 5).

Une modification qui est de nature fonctionnelle est également à prendre en compte au niveau du protocole de découverte topologique.

Nombre d'équipement:

- Avantage :

Avec EtherCAT aucunes limitations dues à la puissance n'est à prendre en compte, ainsi il est possible d'avoir un plus grand nombre d'équipement sur le réseau. Pour augmenter le nombre de module  $\mu$ CAT sur le Bus Capteurs, il suffit de distribuer une alimentation supplémentaire sur la paire Ethernet.

- Impact sur l'architecture du Bus Capteurs:

Modification de l'architecture du Bus Controller avec les deux paires Ethernet reliées au bloc d'alimentation et modification du module  $\mu$ CAT avec le bloc de gestion de l'alimentation relié aux deux nouvelles paires transportant la seconde alimentation.

Distance:

- Avantage :

Comme les équipements d'EtherCAT sont tous actifs (autrement dit signaux régénérés à chaque passage dans un équipement), il est possible d'obtenir une distance max de 100 m entre deux équipements. Ceci est un atout non négligeable car la taille totale du réseau peut être plus conséquente que celle du système Bus Capteurs qui est limitée par sa contrainte de mise en œuvre (pas plus de 5 boîtiers de jonction sans recopie).

- Impact sur l'architecture du Bus Capteurs:

Pour remédier à ce problème, j'ai pensé à réaliser un bouchon dans lequel les signaux sont régénérés avant de sortir de celui-ci. Ce bouchon viendra se plugger sur un boîtier de jonction pour le rendre actif.

**Conclusion :**

Ainsi grâce à l'étude comparative nous avons pu découvrir des éléments et des fonctionnalités qui peuvent être intégrées sur le système Bus Capteurs pour l'améliorer sans pour autant avoir de grandes modifications à apporter sur son architecture.



## 3.5 SECONDE PARTIE: PROTOCOLES DE SYNCHRONISATION.

La seconde problématique posée par ZDS est la synchronisation des horloges des différents équipements distribués sur le réseau Ethernet. Comme ce protocole ne propose pas nativement un moyen d'assurer la synchronisation des horloges des équipements, l'idée est de contourner ce problème en utilisant des protocoles de synchronisation existants fonctionnant sur Ethernet.

Ainsi, la seconde mission de mon stage consistait à étudier le principe de fonctionnement de trois protocoles de synchronisation et à les comparer par la suite pour savoir lequel était le plus adapté pour le Bus Capteurs. Le premier protocole étudié est celui utilisé dans le système Bus Capteurs puis le protocole « Distributed Clock » utilisé dans EtherCAT et enfin le protocole IEEE 1588 v2.0.

### 3.5.1 Moyens mis à disposition :

Avant de se lancer dans l'étude comparative, une compréhension des différents protocoles s'avère nécessaire. Pour cela plusieurs documents et moyens m'ont été confiés afin de m'aider à appréhender ces protocoles de synchronisation.

#### **Document « Spécifications d'Interfaces du Bus Capteurs » :**

Ce document regroupe toutes les informations nécessaires à la compréhension du principe de synchronisation utilisé sur le système Bus Capteurs.

Grâce à ce document, j'ai pu avoir des informations sur le nombre de bits qu'est codé le compteur de datation, la fréquence de l'horloge utilisée, le format des instructions échangées ainsi que son principe de fonctionnement.

Sans ce document, il m'aurait été difficile de comprendre le fonctionnement de ce principe de synchronisation et par la même occasion difficile d'entreprendre l'étude comparative.

#### **Document « IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Network Measurement and Control Systems » :**

Ce document est la norme décrivant le standard de synchronisation IEEE 1588. Il regroupe toutes les informations utiles et nécessaires à la compréhension du protocole PTP.

D'autres informations concernant son principe de fonctionnement ont été trouvées sur Internet.

### 3.5.2 Etude comparative :

#### Démarche :

Afin que les études soient complètes, claires et précises, j'ai décidé de suivre la logique suivante pour chacune d'entre elles.

Dans un premier temps je définis et décris le type de matériel nécessaire à la mise en œuvre du principe de synchronisation ainsi que ses caractéristiques, c'est-à-dire le nombre de bit sur lequel est codé le compteur de datation, la fréquence de l'horloge, la précision de synchronisation et la résolution du compteur de datation.

Ainsi nous voyons, par exemple, que le protocole de synchronisation du Bus Capteurs peut atteindre une précision de 100 ns contre quelques dizaine de nanoseconde pour le protocole IEEE 1588 (dans certaines conditions d'implémentation) et centaines de ns pour le protocole « Distributed Clock ».

J'analyse également où s'effectue ce protocole, autrement dit s'il s'effectue entièrement sur le lien Ethernet ou sur une autre paire (cf. système Bus Capteurs avec sa synchronisation qui utilise la paire Instruction).

Ensuite je m'intéresse à son principe de fonctionnement dans lequel je décris les différentes étapes de synchronisation et j'explique comment sont compensés les différents écarts des compteurs de datation entre les équipements (offset, temps de propagation, drift).

Une fois le principe de fonctionnement expliqué, il ne reste plus qu'à décrire les différentes trames échangées entre les équipements et finir sur les différentes solutions proposées par les constructeurs pour implanter le protocole en question.

Afin d'avoir une idée précise en un « coup d'œil » sur les performances de chacun des protocoles, un tableau récapitulatif regroupe les caractéristiques, le principe de synchronisation, le mécanisme de correction des compteurs de datation, les performances ainsi que les contraintes d'implémentation à la fin du rapport.

#### Analyse :

Après avoir effectué les différentes études et vérifié les impacts du portage, il s'avère que porter le protocole de synchronisation IEEE 1588 sur le Bus Capteurs soit trop contraignant. Ainsi il a été décidé de seulement reprendre quelques mécanismes provenant du protocole DC tel que le mécanisme d'incrémentatation des compteurs de datation, de correction des compteurs ainsi que le mécanisme de calcul du temps de propagation.

### 3.6 SYNTHÈSE.

Ce stage se conclut sur une note positive car l'ensemble des tâches prévues au début ont été menées à bien. L'étude menée sur le principe d'EtherCAT s'avère également positive car, comme nous l'avons vu tout au long de ce document, des principes et fonctionnalités d'EtherCAT ont été retenus et considérés comme intéressants pour être portés sur le système Bus Capteurs afin de l'améliorer.

L'étude de portabilité avec ses impacts sur le système Bus Capteurs a également été concluante car grâce à celle-ci il était possible de constater que le portage d'éléments provenant d'EtherCAT peut être effectué sans pour autant impliquer de lourdes modifications à l'architecture du système Bus Capteurs existant. Ainsi il est possible d'améliorer le système Bus Capteurs sans changer radicalement son architecture.

D'ailleurs, ZDS compte se pencher de plus près sur les éléments proposés en réalisant un système Bus Capteurs amélioré intégrant des fonctionnalités similaires à celles proposées précédemment tel qu'un module  $\mu$ CAT constitué de trois ports Ethernet pour supprimer l'utilisation de boîtiers de Jonction ou encore le principe de fiabilité expliqué précédemment.

En ce qui concerne l'étude de synchronisation, celle-ci s'avère également concluante même s'il a été décidé de ne pas porter le protocole IEEE1588 sur le système Bus Capteurs. Grâce à cette étude nous avons découvert des mécanismes très intéressants utilisés sur EtherCAT qui pourraient améliorer le principe de synchronisation du système Bus Capteurs notamment le mécanisme de correction des compteurs de datation qui n'est pas très souple ou encore avec l'ajout d'un mécanisme de détermination du temps de propagation (actuellement, le système Bus Capteurs ne possède aucun mécanisme de mesure du temps de propagation).

Ainsi ce stage m'a offert une bonne préparation à ma future insertion professionnelle car il fut pour moi une expérience enrichissante qui me conforte dans l'idée de travailler par la suite dans le domaine aéronautique.

## 4. BIBLIOGRAPHIE

### **Documentation :**

Rapport de stage (Etude comparative d'EtherCAT vs Bus Capteurs)  
Spécification d'interface Bus Capteurs  
Spécification d'interfaces du Bus PCM CANNES  
Plan et procédure des tests de validation

### **Internet:**

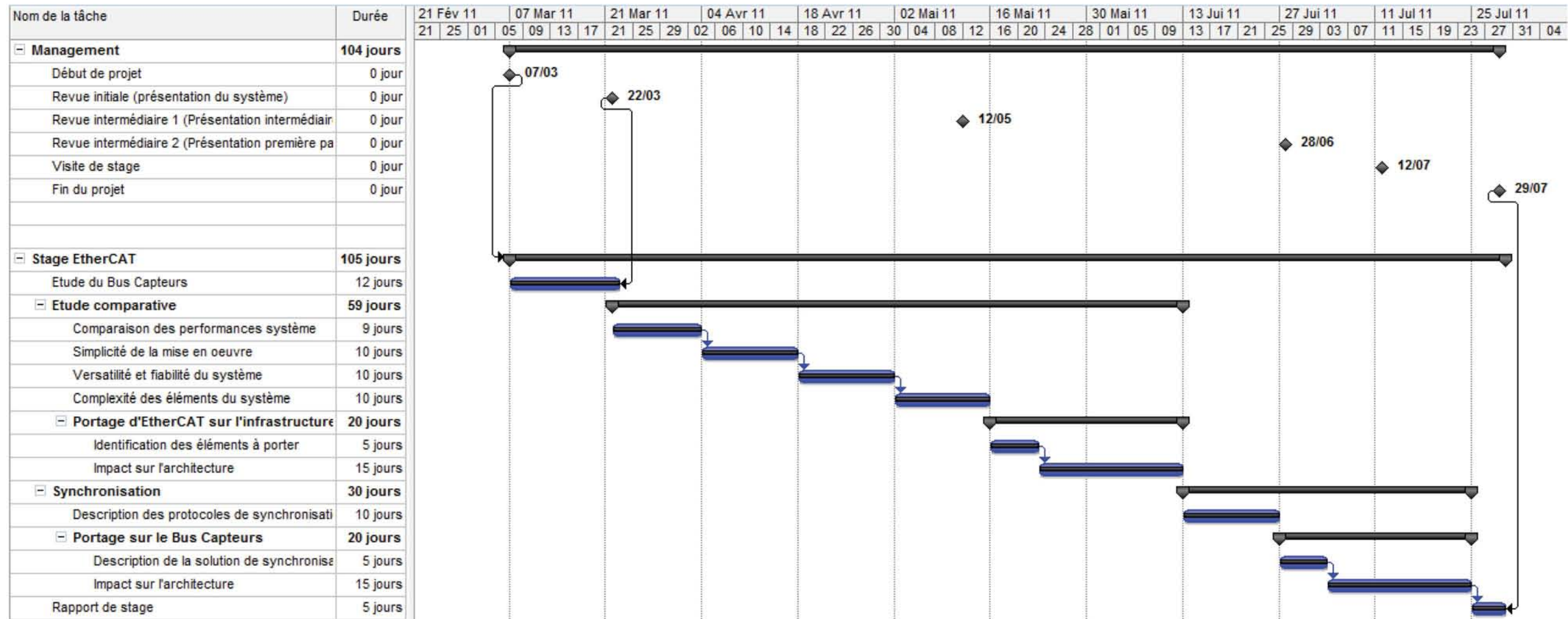
<http://www.beckhoff.com/>  
<http://ethercat.org/>

### **Divers:**

Intranet ZDS

## 5. ANNEXE 1: PLANNING FINAL DU STAGE

Ci-dessous le planning final du stage que j'ai effectué au sein de l'entreprise ZDS.



## ANNEXE 2: DEBITS ETHERCAT VS BUS CAPTEURS

Cas	Bus Capteurs				EtherCAT			
	$Débit_E$ (Mbit/s)	$Débit_A$ (Mbit/s)	$Débit_{U_A}$ (Mbit/s) Paquet plein	$Débit_{U_A}$ (Mbit/s) 1octet/ paquet	$Débit_E$ (Mbit/s)	$Débit_A$ (Mbit/s)	$Débit_{U_A}$ (Mbit/s) Paquet plein	$Débit_{U_A}$ (Mbit/s) 1octet/ paquet
Cas 1	1,969842	1,942591	1,925666	0,194259	1,955177	1,913961	1,897285	0,191396
Cas 2	98,689448	97,324179	96,476243	9,732417	98,694340	96,613827	95,772080	9,661382
Cas 3	0,000512	0,000344	0,000341	0,0000344	0,000512	0,000256	0,0002537	0,0000256
Cas 4 A	1,595445	1,573373	1,559665	0,157337	1,597324	1,563652	1,550028	0,156365
Cas 4 B	1,231593	0,827476	0,820266	0,082747	0,738580	0,369290	0,366072	0,0369290

## ANNEXE 3: ETUDE THEORIQUE 'DECOUVERTE TOPOLOGIQUE'

Ci-dessous nous allons détailler la démarche employée pour la détermination du temps nécessaire au protocole de découverte topologique pour découvrir tous les équipements connectés sur le bus. Cet exemple s'applique sur le système Bus Capteurs. La même démarche a été employée pour l'étude EtherCAT.

Avant de commencer à déterminer le temps nécessaire à la découverte des équipements, une étude du principe de fonctionnement du protocole de découverte topologique était nécessaire. Ensuite, on va s'intéresser aux formats des trames échangées afin de pouvoir calculer le temps de transmission de celles-ci.

Une fois le principe de fonctionnement et le format des trames Ethernet ainsi que des instructions échangées entre le Bus Controller et les modules  $\mu$ CAT connus, il est temps de passer à l'analyse théorique.

Sur le système Bus Capteurs, le protocole de découverte topologique s'effectue sur la paire Ethernet et sur la paire Instruction.

- Découverte topologique sur la paire Ethernet :

Nous allons calculer le temps qu'il faut au Bus Controller pour échanger tous les messages nécessaires à la découverte topologique sur le lien Ethernet.

Bus Controller       $\mu$ CAT 1       $\mu$ CAT 2

$T_p$   
 $T_L$   
 $T_p$   
 $T_L$   
 $T_T$   
 $T_p$   
 $T_L$   
 $T_p$

Echange des messages de découverte topologique du système Bus Capteurs.

Formule du temps de découverte topologique sur le lien Ethernet :

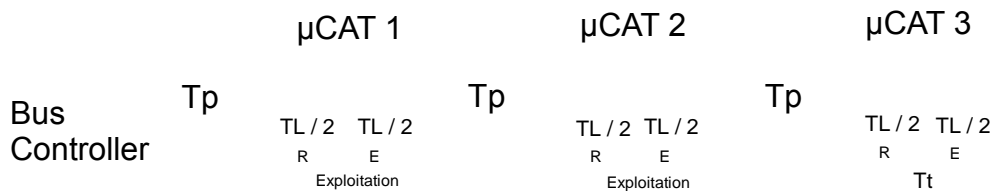
$$T_{dtE} = \sum_{n=1}^m ((2 * T_p * n) + (n * T_L)) + m * T_T + 1 \text{ ms}$$

Avec :

- $m$  le nombre de module  $\mu$ CAT sur le système Bus Capteurs.
  - $T_p$  le temps de propagation entre équipement sur le lien Ethernet.
  - $T_L$  le temps de latence d'un module  $\mu$ CAT. Ce temps correspond à 5  $\mu$ s.
  - $T_T$  le temps de transmission d'une trame TDP-PU
  - 1ms le temps qu'il faut au Bus Controller pour se rendre compte qu'il n'y a plus de module  $\mu$ CAT après le dernier sur le système Bus Capteurs. Ce temps correspond au temps qu'il faut au paquet pour atteindre le dernier  $\mu$ CAT sur lequel s'ajoute l'attente de la réponse (réponse qui n'arrive jamais)
- Découverte topologique sur la ligne Instruction :

Plusieurs messages sont envoyés sur la ligne Instruction par le Bus Controller pour la découverte topologique :

- 1 instruction de reset.
- Plusieurs instructions Loopback OFF.
- 1 instruction Loopback ON.



Modélisation des latences « Instruction » dans les modules  $\mu$ CAT.

Formule du temps de découverte topologique sur la ligne Instruction :

$$T_{Reset} = (m * T_p) + \left( (2 * m - 1) * \frac{T_L}{2} \right) + T_{t\ reset}$$

$$T_{Loopback\ OFF} = \sum_{n=1}^m ((n * T_p) + ((2 * n - 1) * \frac{T_L}{2})) + T_{t\ Loopback\ OFF}$$

$$T_{Loopback\ ON} = (m * T_p) + \left( (2 * m - 1) * \frac{T_L}{2} \right) + T_{t\ Loopback\ ON}$$

$$T_{dtI} = T_{Reset} + T_{Loopback\ OFF} + T_{Loopback\ ON}$$

Avec :

- $m$  le nombre de module  $\mu$ CAT sur le système Bus Capteurs.
- $T_p$  temps de propagation entre équipement sur la ligne Instruction
- $T_L$  temps de latence dans un module  $\mu$ CAT sur la ligne Instruction. Ce temps correspond à 60 ns.
- $T_t$  temps de transmission des trames (Reset, Loopback OFF et Loopback ON).



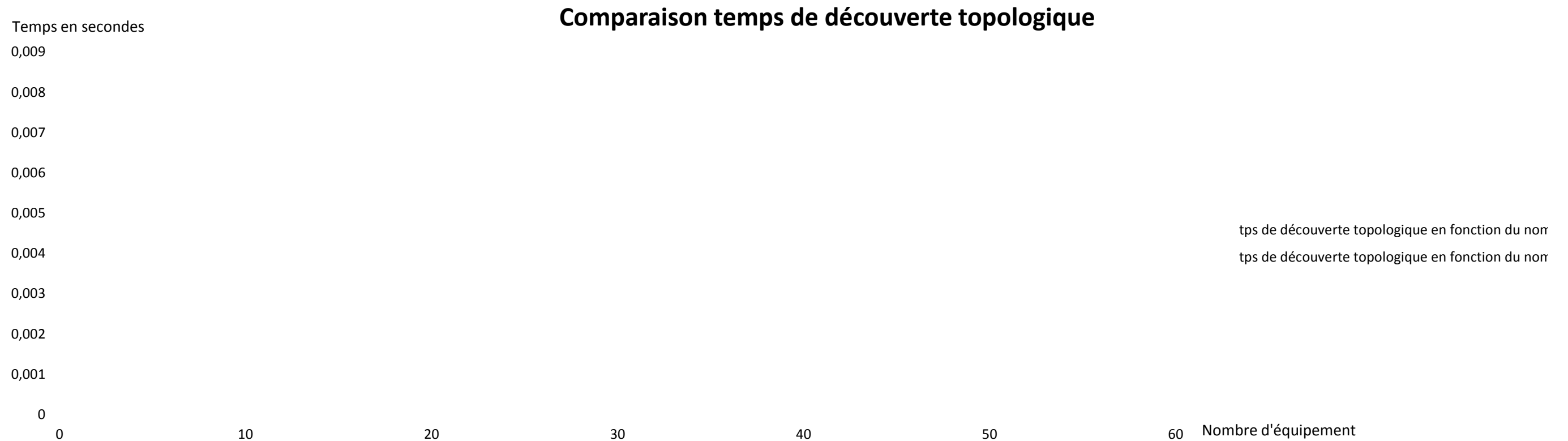
- Temps total de découverte topologique :

Il correspond à la somme du temps de découverte topologique sur le lien Ethernet avec le temps de découverte topologique sur la ligne instruction.

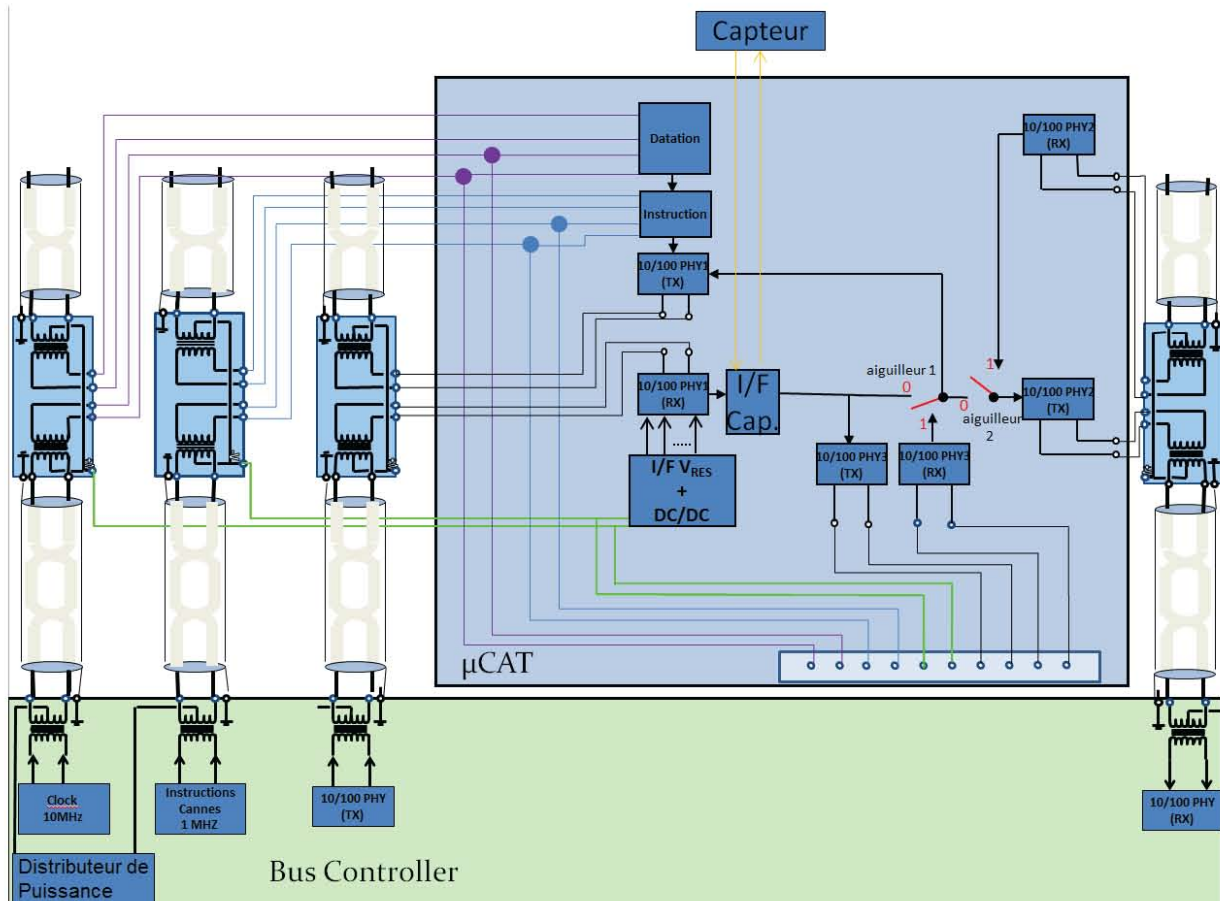
$$T_{dt} = T_{dtE} + T_{dtI}$$

Comparaison des temps de découverte topologique :

La courbe ci-dessous montre le temps qu'il faut à chacun des deux protocoles de découverte topologique pour découvrir l'ensemble des équipements.



## ANNEXE 4: Module $\mu$ CAT à 3 interfaces Ethernet



Différents cas de fonctionnement en fonction de la position des aiguilleurs :

Aiguilleur 1 en position 0 et Aiguilleur 2 en position 0 :

Quand les deux aiguilleurs sont en position 0, cela revient à dire que le module  $\mu$ CAT est en mode Loopback activé.

Aiguilleur 1 en position 1 et Aiguilleur 2 en position 0 :

Dans cette configuration, le module  $\mu$ CAT à sa troisième interface Ethernet activée.

Aiguilleur 1 en position 0 et Aiguilleur 2 en position 1 :

Le module  $\mu$ CAT est en mode de fonctionnement normal.

Aiguilleur 1 en position 1 et Aiguilleur 2 en position 1 :

Le module  $\mu$ CAT à sa troisième interface Ethernet activée et son mode Loopback désactivé.

## ANNEXE 5: Fiabilité : Algorithme d'arbitrage et module $\mu$ CAT

Algorithme d'arbitrage :

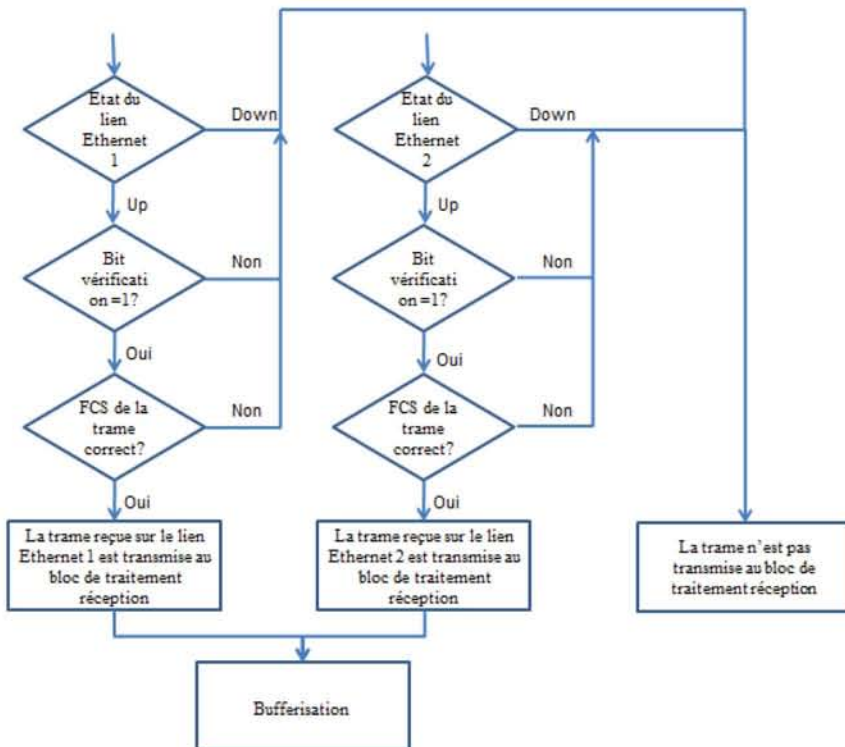
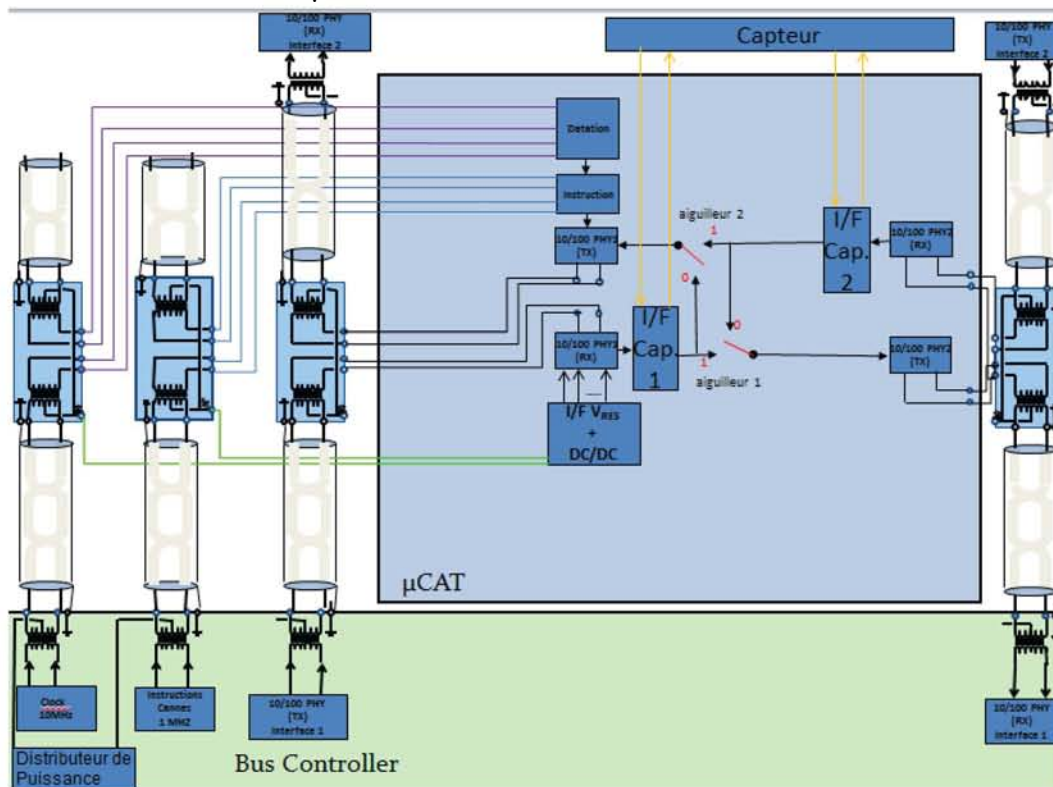


Schéma du nouveau module  $\mu$ CAT :



## RESUME :

Dans le cadre de ses activités Etudes Amonts, ZODIAC DATA SYSTEMS développe un nouveau bus de communication destiné à des applications de télémesures Lanceurs.

L'étude conduite par ZDS a pour objet de définir un « Bus Capteurs » comprenant le protocole de communication, de mise en configuration et la distribution d'énergie sur un seul câble.

Il s'avère que ce Bus Capteurs ait de grands points communs avec un protocole nommé EtherCAT.

Ainsi le stage a comme objectif une étude comparative de la solution Bus Capteurs vis-à-vis du principe d'EtherCAT qui est en cours de normalisation.

La mission se décompose principalement en deux parties :

La première est une étude comparative à proprement parlé, dans laquelle je devais comparer les performances, la simplicité de mise en œuvre, la versatilité, la fiabilité ainsi que de la complexité des éléments des deux systèmes. Si cette étude s'avère concluante, une solution de portage d'EtherCAT sur l'infrastructure Bus Capteurs de ZDS pourrait être envisagée avec une étude de l'impact sur celle-ci.

La seconde partie est quant à elle une étude comparative des protocoles de synchronisation EtherCAT et IEEE1588 dans laquelle la description des deux protocoles sera faite ainsi que l'impact qu'ils pourraient avoir sur l'architecture du système Bus Capteurs si un des deux protocoles est porté sur celle-ci.

## MOTS-CLES :

EtherCAT, Bus de terrain, réseaux Ethernet, IEEE 1588, TwinCAT, Beckhoff Automation, Bus Capteurs, norme IEC 61158, Ethernet Industriel, temps réel.

## ABSTRACT:

ZODIAC DATA SYSTEMS develop a new fieldbus who can be used to cover the new telemetry requirements in the upper stage of launcher. They want to create a fieldbus implementing a digital communication link and a power distribution scheme on the same cabling infrastructure.

The sensor bus system has some resemblances with a protocol called EtherCAT. Then the aim of the project is to compare the both systems.

The mission comprises of two main parts:

The first part is a comparative study. The aim of this part is to compare the performance, the simplicity of implementation, the reliability and the complexity of elements of both systems.

Once the best features chosen, another study must be made on the impacts which they could have on the sensor bus system architecture.

The second part is a comparative study of 3 synchronization protocols. The first is the protocol used in the sensor bus system, the second is the Distributed Clock protocol used in EtherCAT and the third is the precision time protocol of the IEEE standard.

## KEYWORDS:

EtherCAT, Fieldbus, Ethernet protocol, IEEE 1588 Precision Time Protocol, TwinCAT, Beckhoff Automation, Sensor Bus, norme IEC 61158, Industrial Ethernet, real time.