



Effet de l'écart de synchronisation sur le temps de cycle de solutions basées sur Ethernet

Jérémy Robert, Jean-Philippe Georges, Thierry Divoux

► To cite this version:

Jérémy Robert, Jean-Philippe Georges, Thierry Divoux. Effet de l'écart de synchronisation sur le temps de cycle de solutions basées sur Ethernet. Ecole d'été temps réel, Aug 2011, Brest, France. pp.211-214. hal-00623532

HAL Id: hal-00623532

<https://hal.science/hal-00623532>

Submitted on 14 Sep 2011

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.

Effet de l'écart de synchronisation sur le temps de cycle de solutions basées sur Ethernet

Jérémy Robert, Jean-Philippe Georges, Thierry Divoux
Centre de Recherche en Automatique de Nancy Nancy-Université, CNRS
Campus Sciences, BP 70239, 54506 Vandœuvre lès Nancy cedex
Email: jeremy.robert@cran.uhp-nancy.fr

Résumé—Les communications industrielles reposent de plus en plus sur le standard Ethernet en dépit de ses inconvénients intrinsèques (particulièrement sa méthode d'accès au médium non déterministe). De nombreuses solutions sont actuellement disponibles sur le marché. Le défi est alors pour les industriels de sélectionner la technologie la plus appropriée tout en ayant un regard critique sur les performances annoncées. En effet, celles-ci sont biaisées dès que l'on se place dans un cas non idéal (écart de synchronisation par exemple). L'objectif de ce papier est de montrer l'influence de l'écart de synchronisation sur la contrainte de temps de cycle évaluée dans des travaux précédents.

Mots-clés—analyse de performances, réseaux temps réel.

I. INTRODUCTION

Les systèmes industriels s'articulent de plus en plus sur le standard Ethernet (par exemple en systèmes de production chez Jaguar, Alstom Power, en avionique chez EADS avec l'Avionics Full-Duplex Switched Ethernet (ou AFDX) [1], ...). Les bénéfices sont la réduction des coûts d'installation du réseau (composants sur étagères) et la réduction des problèmes d'interopérabilité. D'autres intérêts peuvent être cités : Ethernet est un protocole connu, largement implémenté et ses performances augmentent continuellement avec l'évolution des technologies (particulièrement sa bande passante). Fort de ces avantages, de nombreuses solutions basées sur Ethernet ([2], [3] et [4]) apparaissent sur le marché.

Deux d'entre elles ont été évaluées par [5] et [6]. Les résultats de ces articles sur la comparaison entre EtherCAT et Profinet IRT ont alors été affinés dans [7] et étendus aux solutions Modbus/TCP et EtherNet/IP. Ces protocoles correspondent aux solutions les plus répandues d'Ethernet industriel. Les résultats de l'évaluation relative au temps de cycle dans le cas idéal ne sont pas reportés ici, mais peuvent être consultés dans [7]. L'objectif de ce papier est de montrer l'influence de l'écart de synchronisation sur cette contrainte précédemment établie. En effet, ne pas prendre en compte cet écart peut conduire à surestimer la faisabilité d'un scénario de commande. Comme il a été montré dans [7], seules les solutions Profinet IRT et Ethernet/IP sont soumises à ce problème de synchronisation.

II. RAPPEL DES EXPRESSIONS DU TEMPS DE CYCLE

Cette section a pour objectif de rappeler les différentes expressions du temps de cycle minimum (noté Γ) établies dans [7] permettant à un ingénieur d'ajuster la fréquence minimale de rafraîchissement des données. Ces expressions

pourront alors être comparées avec les nouvelles présentées dans ce papier qui prennent en compte l'écart de synchronisation. Par rapport au temps de cycle qui intègre le temps de lecture/écriture des données et le temps de traitement, la définition suivante est introduite :

DÉFINITION 1 : Le temps de cycle minimum correspond au temps de communication nécessaire pour collecter et mettre à jour les informations des équipements.

Son expression est obtenue en fonction de paramètres comme le nombre d'équipements (noté n), la latence des équipements (ℓ), le temps de propagation (δ) et le temps de transmission (τ , lui-même fonction de l'encapsulation, de la taille des données L et de la capacité du lien C). Une topologie linéaire est exploitée dans l'ensemble des solutions étudiées (FIGURE 1). Seules les expressions de Profinet IRT et EtherNet/IP sont rappelées. En effet, dans EtherCAT, seul le maître peut initier les échanges sur le réseau. De la même façon, dans Modbus/TCP, les équipements sont synchronisés par les événements réseau. Ainsi, l'effet d'un écart de synchronisation n'a pas à être étudié sur ces deux solutions.

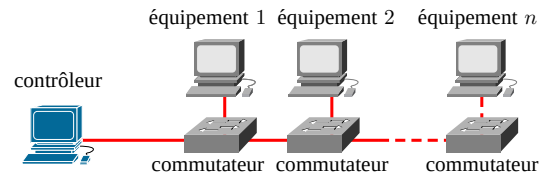


FIGURE 1. Un exemple de topologie linéaire

A. Profinet IRT

Le protocole Profinet IRT (*Isochronous Real-Time*) est développé par Siemens. Profinet IRT requiert un matériel spécifique sur les équipements (ASIC de type commutateurs 2 ou 4 ports intégrés). La particularité de cette solution est d'utiliser le *slipstreaming effect* qui consiste en l'envoi par le contrôleur des trames dans un ordre particulier : de l'équipement le plus éloigné au plus proche sur la topologie linéaire. L'estimation du temps de cycle peut être définie par :

$$\Gamma = \delta + \ell + n \frac{8}{C} (38 + \max(46, 6 + L)) \quad (1)$$

Dans cette solution, chaque équipement doit émettre à une date précise. Un écart de synchronisation peut donc augmenter significativement le temps de cycle. L'effet de l'écart de synchronisation est étudié dans la section suivante.

B. Ethernet/IP

Ethernet/IP (IP signifie *Industrial Protocol*) est un réseau développé par Rockwell Automation en 2001. Ethernet/IP utilise CIP (*Common Industrial Protocol*) ce qui permet l'emploi de produits sur étagère compatibles avec la pile TCP-UDP/IP. L'étude menée dans [7] s'appuie sur une topologie commutée linéaire. Le temps de cycle minimum est défini par :

$$\Gamma = 2\delta + \ell + 8n \frac{84 + L}{C} \quad (2)$$

Comme dans Profinet IRT, nous proposons d'utiliser le *slipstreaming effect* dans Ethernet/IP dans la mesure où il permet de minimiser le temps de cycle. Par conséquent, il est nécessaire d'analyser l'effet de la non synchronisation sur le temps de cycle minimum.

C. Conclusion

Il a été rappelé les expressions du temps de cycle de Profinet IRT et Ethernet/IP dans des cas idéaux. Celles-ci peuvent être remises en cause dans le cas où il y a écart de synchronisation. La section suivante permet de montrer l'impact de cet écart de synchronisation sur le temps de cycle minimum.

III. EFFET DE L'ÉCART DE LA SYNCHRONISATION SUR LE TEMPS DE CYCLE MINIMUM

L'objectif de cette section est de mettre en avant l'effet de l'écart de synchronisation sur le temps de cycle minimum. Pour déterminer le temps de cycle avec écart de synchronisation, nous calculerons le *delivery time*, qui est un autre paramètre de Qualité de Service, défini dans le standard IEC 61784 comme étant le délai pour acheminer une donnée d'un nœud à un autre. Le temps de cycle permet de vérifier la faisabilité d'un scénario de commande tandis que le *delivery time* correspond davantage à la fraîcheur de l'information.

A. Profinet IRT

1) *Estimation du delivery time en cas d'écart de synchronisation*: Cette première partie a pour objectif de montrer l'effet de l'écart de synchronisation sur le *delivery time*. Il s'agit de l'écart (dû notamment à la dérive des horloges) entre les dates de départ des messages définies par le *slipstreaming effect* et celles observées en réalité. Pour un nœud i , on note x_i cet écart. Il peut être positif, négatif ou nul. La FIGURE 2 montre l'enchaînement des messages émis par deux équipements vers un même contrôleur. Le graphe du haut correspond au principe du *slipstreaming effect* où la date t_2 correspond à la date du départ du message du second équipement permettant de minimiser à la fois le *delivery time* et le temps de cycle. Le graphe du bas montre une évolution si le message part à une autre date t'_2 , tel que $x_2 > 0$.

La FIGURE 2 met en évidence le fait qu'un écart de synchronisation pourra introduire une variation du temps de cycle. Cette variation est fonction de la précision de la synchronisation (ou *time synchronization accuracy* dans le standard IEC 61784). Elle est liée à la valeur maximale x des écarts de synchronisation où $\forall i, j \in \mathbb{N}, j \neq i, x = \max(x_{i-j})$ avec x_{i-j} correspondant à : $\forall i, j \in \mathbb{N}, j \neq i, x_{i-j} = x_i - x_j$.

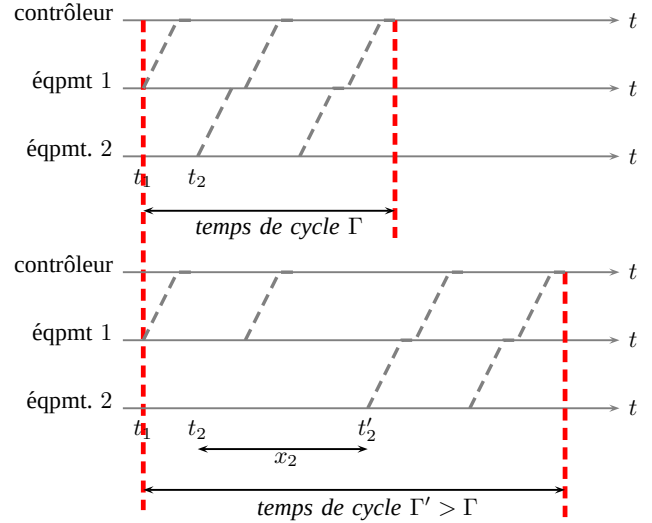


FIGURE 2. Effet de l'écart de synchronisation sur le temps de cycle. Diagrammes spatio-temporel de Profinet IRT (en haut, sans écart $x_2 = 0$; en bas, avec écart $x_2 > 0$).

On considère que l'écart maximum entre tous les nœuds horloge est inférieur au temps de transmission (on note $|x| < \tau$). Cette hypothèse nous garantit que l'écart ne remet pas en cause le *slipstreaming effect* et que l'ordre de transmission des trames n'est pas modifié : une trame de l'équipement n sera transmise avant celle de l'équipement $n + 1$. Deux cas sont alors à considérer : un équipement envoie sa trame plus tôt ($x_i < 0$) ou plus tard ($x_i > 0$) que prévu.

Le *delivery time* peut être exprimé de la façon suivante :

$$\begin{aligned} d_1 &= \tau + \delta + \ell \\ d_2 &= \tau + 2\delta + 2\ell + [x_{1-2}]^+ \\ d_3 &= \tau + 3\delta + 3\ell + [x_{1-2}]^+ + [x_{2-3}]^+ \end{aligned}$$

où $[x]^+ = x$ si $x \geq 0$, sinon $[x]^+ = 0$. Cette notation permet de prendre en considération les deux cas exposés précédemment. Par récurrence, le *delivery time* pour l'équipement i s'obtient par :

$$d_i = d_{i-1} + \delta + \ell + [x_{(i-1)-i}]^+$$

Il est à noter qu'il est nécessaire de connaître le *delivery time* de l'équipement précédent pour obtenir celui de l'équipement donné. En considérant l'expression de d_i précédemment établie, une expression générale de ce paramètre est obtenue :

$$d_i = d_1 + (i-1)\delta + (i-1)\ell + \sum_{j=2}^i [x_{(j-1)-j}]^+$$

Comme le *delivery time* de l'équipement 1 ne varie pas, l'expression précédente peut être développée ainsi :

$$d_i = (\tau + \delta + \ell) + (i-1)\delta + (i-1)\ell + \sum_{j=2}^i [x_{(j-1)-j}]^+$$

Finalement, le *delivery time* de l'équipement i devient :

$$d_i = \tau + i\delta + i\ell + \sum_{j=2}^i [x_{(j-1)-j}]^+ \quad (3)$$

Ce délai est alors la somme des temps de propagation (δ) et de transmission (τ), des latences des équipements (ℓ) et de la somme de l'écart maximum entre les nœuds. Pour ce type de topologie linéaire, on retrouve donc ici un écart maximum entre deux nœuds linéaire. On peut alors noter : $x_{1-3} = x_{1-2} + x_{2-3}$ et en généralisant à i équipements :

$$x_{1-i} = x_{1-2} + x_{2-3} + \dots + x_{(i-1)-i} = \sum_{j=2}^i x_{(j-1)-j}$$

La somme dans (3) peut donc être remplacée par x_{1-i} :

$$d_i = \tau + i\delta + i\ell + x_{1-i}$$

De plus, la définition de x permet de spécifier que : $\forall i, j \in \mathbb{N}, i \neq j, x = \max(x_{i-j}) \Rightarrow x_{i-j} \leq x \Rightarrow x_{1-i} \leq x$

Finalement, il est possible de borner le *delivery time* par :

$$d_i \leq \tau + i\delta + i\ell + x$$

Ce délai correspond à la somme des temps de propagation (δ) et de transmission (τ), des latences des équipements (ℓ) et de la somme des déviations maximum entre les nœuds les plus éloignés. Considérons à présent le cas où l'hypothèse $|x| < \tau$ n'est plus satisfaite, le *slipstreaming effect* a donc un effet néfaste pour le *delivery time* et le temps de cycle. En effet, sans cette hypothèse, il est nécessaire de considérer deux cas : l'un où les trames ne sont pas en concurrence pour l'accès aux commutateurs (FIGURE 3) et celui où elles se retrouvent en concurrence (FIGURE 4).

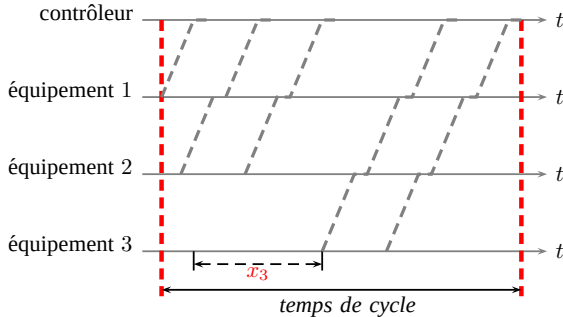


FIGURE 3. Diagramme spatio-temporel de Profinet IRT avec écart de synchronisation sur l'équipement 3 (impliquant une trame sans concurrence)

Dans le premier cas, l'expression du *delivery time* est identique à celle sans écart de synchronisation, à savoir :

$$d_i = i\delta + i\ell + \tau \quad (4)$$

Dans le second, le *delivery time* est augmenté de la latence introduite par la concurrence des $(n-1)$ autres trames $(n-1)$ temps de transmission). Ce *delivery time* est donc borné par :

$$d_i \leq i\delta + i\ell + \tau + (n-1)\tau \quad (5)$$

2) *Temps de cycle minimum en cas d'écart de synchronisation*: Il est nécessaire de séparer les dates d'émission et de réception. La date d'émission de la trame de l'équipement i est notée E_i , alors que la date de réception est notée R_i . Par rapport à (1), le temps de cycle est exprimé comme la

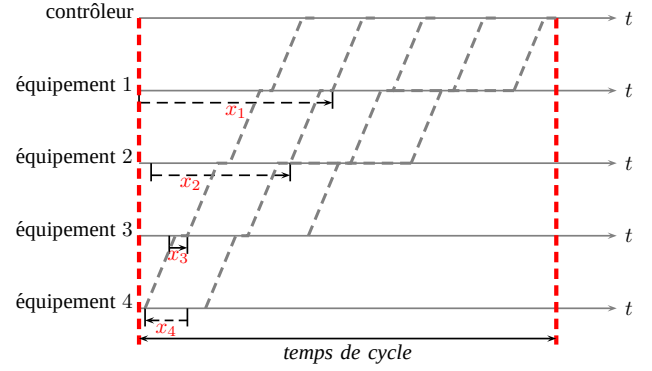


FIGURE 4. Diagramme spatio-temporel de Profinet IRT avec écart de synchronisation sur tous les équipements (impliquant la concurrence de la trame 3 avec toutes les autres)

différence entre la date de réception maximum et la date d'émission minimum : $\Gamma = \max(R_i) - \min(E_i)$

Déterminons alors les termes R_i et E_i . Dans Profinet IRT, les dates d'émission sont définies de la façon suivante :

$$\begin{aligned} E_1 &= t_s \\ E_2 &= t_s + \tau - \delta - \ell - x_{1-2} \\ E_3 &= t_s + 2\tau - 2\delta - 2\ell - x_{1-2} - x_{2-3} \end{aligned}$$

avec t_s la date à laquelle est envoyée la première trame.

Comme pour le *delivery time*, nous obtenons par récurrence l'expression de la date d'émission de l'équipement i :

$$E_i = E_{i-1} + \tau - \delta - \ell - x_{(i-1)-i}$$

La date d'émission de l'équipement i est fonction de la date d'émission de l'équipement précédent $i-1$. Réécrivons cette expression de manière à ne plus être contraint à calculer les dates d'émission précédentes :

$$E_i = E_1 + (i-1)\tau - (i-1)\delta - (i-1)\ell - \sum_{j=2}^i x_{(j-1)-j}$$

La date d'émission de la trame de l'équipement i s'écrit ainsi :

$$E_i = t_s + (i-1)\tau - (i-1)\delta - (i-1)\ell - \sum_{j=2}^i x_{(j-1)-j}$$

Comme précédemment, la date d'émission peut être bornée (cf définition de l'écart maximum entre deux nœuds) :

$$E_i \leq t_s + (i-1)\tau - (i-1)\delta - (i-1)\ell - x$$

La date de réception est définie comme la somme de la date d'émission et de son (pire) *delivery time* (5) :

$$\begin{aligned} R_i &= E_i + d_i \\ R_i &\leq t_s + (i-1)\tau - (i-1)\delta - (i-1)\ell - x + i\delta + i\ell \\ &\quad + \tau + (n-1)\tau \\ &\leq t_s + i\tau + \delta + \ell - x + (n-1)\tau \end{aligned}$$

Le temps de cycle est alors obtenu de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \Gamma &\leq \max(t_s + i\tau + \delta + \ell - x + (n-1)\tau) \\ &\quad - \min(t_s + (i-1)\tau - (i-1)\delta - (i-1)\ell - x) \end{aligned}$$

Le temps de cycle en cas d'écart de synchronisation est borné par la différence des dates de réception et d'émission. Il est donc nécessaire pour un ingénieur de prendre en considération une marge de manœuvre (équivalente à la somme des déviations maximums x et des temps de transmission $n-1$ fois) relative à ce possible écart de synchronisation dans le choix du temps de cycle.

B. Ethernet/IP

1) *Estimation du delivery time en cas d'écart de synchronisation*: Comme pour Profinet IRT, il est important d'estimer l'impact de l'écart de synchronisation sur le *delivery time* et le temps de cycle. L'approche reste ici la même. L'analyse ne considère toutefois que les erreurs de synchronisation sur les équipements (et non sur les commutateurs). Pour k équipements par commutateur, le *delivery time* peut-être borné par :

$$d_i \leq \tau + (m_i + 1)\delta + m_i\ell + x \quad \forall m_i = \lceil i/k \rceil \quad (6)$$

Comme pour Profinet IRT (cf section III-A1), dans le cas où une trame n'est pas en concurrence, le *delivery time* est :

$$d_i = \tau + (m_i + 1)\delta + m_i\ell$$

Dans le cas où la trame est en concurrence avec toutes les autres, le *delivery time* est borné par :

$$d_i \leq \tau + (m_i + 1)\delta + m_i\ell + (n - 1)\tau \quad (7)$$

2) *Temps de cycle minimum en cas d'écart de synchronisation*: Comme pour Profinet IRT, le temps de cycle est défini de la façon suivante :

$$\Gamma = \max(R_i) - \min(E_i)$$

Les dates d'émission sont également bornées :

$$E_i \leq t_s + (i - 1)\tau - (m_i + 1)\delta - (m_i - 1)\ell - x$$

Et les dates de réception sont obtenues par l'expression :

$$\begin{aligned} R_i &= E_i + d_i \\ R_i &\leq t_s + i\tau + 2\delta + \ell - x + (n - 1)\tau \end{aligned}$$

Ainsi, le temps de cycle peut être écrit :

$$\Gamma = \max(t_s + i\tau + 2\delta + \ell - x + (n - 1)\tau) - \min(t_s + (i - 1)\tau - (m_i + 1)\delta - (m_i - 1)\ell - x)$$

Le temps de cycle (2) et le *delivery time* sans écart de synchronisation sont plus importants que ceux avec écart de synchronisation. Cette déviation doit alors être considérée dans la conception d'un processus industriel.

IV. DISCUSSIONS

L'objectif de cette partie est d'analyser l'impact d'un écart de synchronisation sur ces deux solutions basées sur Ethernet. La comparaison est réalisée à 100 Mb/s. Chaque équipement envoie une trame de 16 octets de données utiles (correspondant à une valeur acceptable dans les communications industrielles). Le temps de propagation est de 50 ns et correspond à une distance de 10 m entre équipements. Dans cette étude,

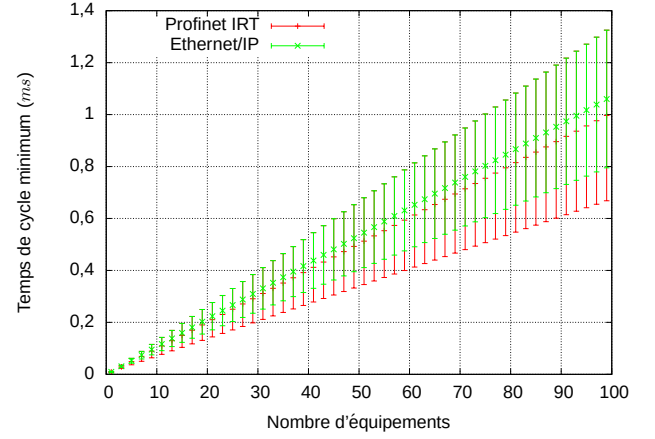


FIGURE 5. Variation du temps de cycle minimum en fonction du nombre d'équipements relativement à l'incertitude de synchronisation (100 Mb/s). La borne inférieure correspond au cas idéal sans écart de synchronisation.

on considère que les commutateurs introduisent une latence électronique de 3 μ s.

La FIGURE 5 montre la variation du temps de cycle en fonction du nombre d'équipements dû à l'écart de synchronisation potentielle. Il est clair que cette variation est d'autant plus importante qu'il y a d'équipements. En effet, cela s'explique par une latence due à la concurrence avec l'ensemble des autres trames de tous les équipements. Cette variation est identique pour les deux solutions dû à l'emploi du *slipstreaming effect*.

V. CONCLUSION

Ce papier met en avant que la synchronisation est un point essentiel dans la conception d'un réseau industriel. En effet, il a été montré l'impact que pouvait avoir un écart de synchronisation sur le temps de cycle et le *delivery time* sur des solutions industrielles qui n'ont pas une synchronisation basée sur les événements du réseau. Dans ce papier, l'écart de synchronisation a été supposé borné (potentiellement au bénéfice d'un protocole de synchronisation comme IEEE 1588). De prochains travaux pourront s'intéresser à l'évaluation de ces écarts de synchronisation.

RÉFÉRENCES

- [1] Grieu, "Analyse et évaluation de techniques de commutation ethernet pour l'interconnexion des systèmes avioniques," Thèse, 2004.
- [2] M. Alves, E. Tovar, and F. Vasques, "Ethernet goes real-time : a survey on research and technological developments," Groupe de recherche IPP-HURRAY, Polytechnic Institute of Porto (ISEP-IPP), Tech. Rep. HURRAY-TR-2K01, Jan. 2000.
- [3] J.-D. Decotignie, "A perspective on ethernet-tcp/ip as a fieldbus," in *4th IFAC International Conference on Fieldbus Systems and their Applications (FET'2001)*, Nancy, France, Nov. 2001, pp. 138–143.
- [4] J.-D. Decotignie, "Ethernet-based real-time and industrial communications," vol. 93, no. 6, jun 2005, pp. 1102–1117.
- [5] J. Jasperneite, M. Schumacher, and K. Weber, "Limits of increasing the performance of industrial ethernet protocols," in *ETFA*, Patras, Greece, Sep 2007, pp. 17 – 27.
- [6] G. Prytz, "A performance analysis of ethercat and profinet irt," in *ETFA*, 2008, pp. 408–415.
- [7] J. Robert, J. Georges, E. Rondeau, and T. Divoux, "Analyse de performances de protocoles temps-réel basés sur Ethernet," 2010.