



HAL
open science

Analyse de performances de la période sans contention de IEEE 802.15.4 pour des applications industrielles temps réel

Nicolas Salles, Nicolas Krommenacker

► **To cite this version:**

Nicolas Salles, Nicolas Krommenacker. Analyse de performances de la période sans contention de IEEE 802.15.4 pour des applications industrielles temps réel. 5ème École d'été Temps Réel, Sep 2007, Nantes, France. hal-00250181

HAL Id: hal-00250181

<https://hal.science/hal-00250181>

Submitted on 11 Feb 2008

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

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

Analyse de performances de la période sans contention de IEEE 802.15.4 pour des applications industrielles temps réel

Nicolas SALLES et Nicolas KROMMENACKER
Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN – UMR 7039),
Nancy-Université, CNRS
Faculté des Sciences et Techniques, BP 239,
54 506 Vandœuvre-lès-Nancy CEDEX, FRANCE
prenom.nom@cran.uhp-nancy.fr

Résumé

La demande des grandes compagnies pour utiliser des réseaux sans fil en milieu industriel devient de plus en plus forte. Toutefois, les contraintes temps réel caractéristiques des communications industrielles doivent être vérifiées pour que ces réseaux soient effectivement adoptés. Dans cet article, nous présentons une analyse de performances du protocole IEEE 802.15.4 pour étudier sa capacité à écouler du trafic temps réel. Cette analyse va servir à déterminer les valeurs limites admissibles par le protocole, en termes de temps de cycle et du nombre de messages par cycle.

Mots clés : IEEE 802.15.4, réseau sans fil industriel, analyse de performances, temps réel.

1. Introduction

La demande des grandes compagnies pour utiliser des réseaux sans fil en milieu industriel devient de plus en plus forte. Toutefois, les contraintes temps réel caractéristiques des communications industrielles doivent être vérifiées pour que ces réseaux soient effectivement adoptés. Dans cet article, nous présentons une analyse de performances du protocole IEEE 802.15.4 pour étudier sa capacité à écouler du trafic temps réel. Cette analyse va servir à déterminer les valeurs limites admissibles par le protocole, en termes de temps de cycle et du nombre de messages par cycle. Le développement rapide des technologies de réseaux sans fil [1] permet d'envisager dès maintenant leur utilisation dans le cadre des applications industrielles. En effet, les réseaux sans fil apportent des avantages indéniables en termes de mobilité et de réduction des coûts de câblage. Toutefois, les échanges de données dans les applications industrielles sont caractérisés par des contraintes de temps réel qui doivent être respectées par le support de communication. En d'autres mots, l'accès au medium doit être déterministe. Le protocole IEEE 802.15.4 [5], le plus récent standard de réseau sans

fil, fortement associé à l'appellation commerciale Zigbee, intègre un mécanisme de réservation du medium garantissant un délai de transmission borné.

Dans cet article, nous présentons une analyse de performances du protocole IEEE 802.15.4 pour étudier sa capacité à écouler du trafic temps réel. Cette analyse va servir à déterminer les valeurs limites admissibles par le protocole, en termes de temps de cycle et du nombre de messages par cycle.

L'article est structuré en quatre parties. La Section 2 fait un état de l'art des travaux sur l'évaluation de performance des technologies sans fil lorsqu'elles sont utilisées en milieu industriel. La Section 3 présente les principes du protocole IEEE 802.15.4, en détaillant notamment le mécanisme de réservation du médium. L'analyse de performance de la période sans contention est développée Section 4. La Section 5 montre, à travers un cas d'application, comment exploiter les résultats de l'analyse de performance pour paramétrer correctement le protocole, connaissant les caractéristiques du trafic temps réel exigé.

2. État de l'art

Il existe actuellement plusieurs technologies de réseaux sans fil, parmi lesquelles on trouve par ordre d'apparition les standards IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 et IEEE 802.15.4, respectivement associés aux noms commerciaux WiFi, Bluetooth et Zigbee. La première de ces spécifications, IEEE 802.11, est aujourd'hui la plus utilisée dans les réseaux locaux. Elle s'appuie sur une méthode d'accès au medium CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) non déterministe. Une seconde méthode optionnelle, dénommée PCF (Point Coordination Function), permet, quant à elle, de garantir la transmission d'un trafic contraint par le temps. Plusieurs travaux [3, 9] ont notamment étudié les performances de IEEE 802.11 à supporter des applications industrielles.

La technologie Bluetooth a, pour sa part, été mise

au point dans le but de supprimer les liaisons filaires entre les équipements, sur des distances très faibles ($\approx 10\text{m}$). Les applications visées sont principalement celles de la micro-informatique (imprimante, clavier, souris, téléphone portable, ...). La transmission de flux temps réel sur Bluetooth a déjà été étudiée aussi bien pour des applications multimédias [6] que industrielles [10]. Ce protocole bien que répondant aux attentes de communications à courte portée pose, du fait de sa complexité et de sa forte consommation d'énergie, des difficultés quant à son utilisation par des appareils autonomes.

D'autres travaux ayant pour objectif de réduire la consommation d'énergie dans le but de disposer d'équipements miniaturisables, autonomes et économiques ont alors été menés et ont donné lieu à la proposition d'un nouveau standard IEEE 802.15.4 [4]. Ce standard spécifie deux mode d'accès au médium : avec contention (Contention Access Period (CAP)), et sans contention (Contention Free Period (CFP)). Si plusieurs travaux [7, 11] ont étudié les performances du mode avec contention, le second mode n'a, quant à lui, fait l'objet que de peu de travaux. À notre connaissance les seuls travaux sont exposés dans [8] et évaluent les débits de transmission possibles dans la période sans contention en relation avec la consommation d'énergie.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent nos travaux.

3. La méthode d'accès CFP du standard IEEE 802.15.4

Le standard IEEE 802.15.4 définit un protocole réseau de communication sans fil concernant les seules couches liaison et physique, avec l'objectif de minimiser la consommation d'énergie utilisée pour la communication. La méthode d'accès sans contention CFP est présente uniquement dans son mode synchronisé par des trames balises comme représenté à la figure 1.

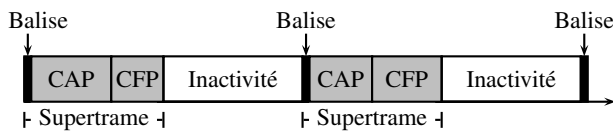


Figure 1: Mode de communication IEEE 802.15.4 avec trames balise.

L'espace de communication, appelé supertrame, est partagé entre les deux méthodes d'accès, CAP et CFP. La communication dans la période sans contention (CFP) est caractérisé par des espaces de temps appelés Guaranteed Time Slots (GTS) (fig. 2). Ces espaces de temps sont attribués à une communication entre 2 stations garantissant ainsi l'accès au canal pour l'émetteur.

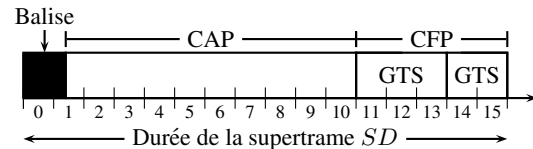


Figure 2: Composition d'une supertrame.

4. Évaluation de performances

Afin d'évaluer les performances d'une communication garantie par des réservations GTS, nous nous intéressons dans cette partie à l'évaluation de la capacité d'un réseau IEEE 802.15.4 à garantir le temps de cycle d'une application industrielle.

Nous considérons, par la suite, la configuration réseau présentant le meilleur débit de transmission à savoir que la communication étudiée emploiera une des fréquences de la bande ISM 2 400-2 483,5 MHz associée à la modulation O-QPSK.

4.1. Calcul du temps de cycle

Dans le cadre de notre analyse de performances, nous ne considérons pas, dans nos communications, le temps d'inactivité (fig. 1). Dès lors, le délai entre deux supertrames, ou temps de cycle, sera donc égal à la durée SD d'une supertrame.

La durée de la supertrame est définie comme $SD = 2^{SO} \times aBaseSlotDuration \times aNumSuperframeSlots$ avec $aBaseSlotDuration$ et $aNumSuperframeSlots$ des constantes fixées par le standard. SO est l'ordre de la supertrame, il s'agit de la variable de configuration de la supertrame. Dans le cas considéré, on peut définir l'évolution du temps de cycle en fonction de l'ordre choisi de la supertrame SO (fig. 3).

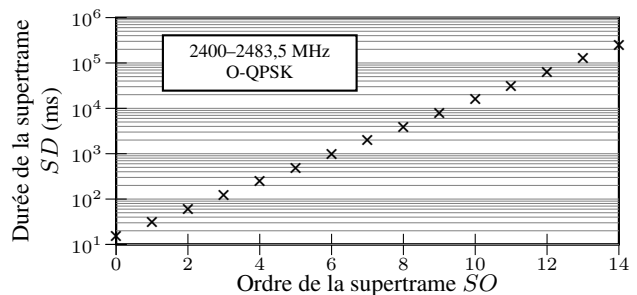


Figure 3: Temps de cycle en fonction de l'ordre de la supertrame SO .

Le temps de cycle varie ainsi entre 15,36 ms et 251,6 s.

Afin de déterminer le temps de cycle, il est donc nécessaire de caractériser davantage le paramètre régissant l'ordre du réseau considéré, à savoir l'ordre de la supertrame SO .

4.2. Évaluation de l'ordre de la supertrame

L'ordre de la supertrame est le paramètre permettant de caractériser un réseau et les performances qui lui sont associées en terme de temps de cycle et de débit. Ce paramètre étant laissé au libre choix du coordinateur, nous proposons ici de définir quelques règles permettant de le définir en adéquation avec les performances recherchées.

Pour ce faire nous traitons dans un premier temps, les contraintes du réseau afin de déterminer une condition permettant de garantir la durée minimale de la supertrame imposée par la spécification. Dans un second temps, nous considérons les obligations d'un réseau à satisfaire une application en terme de données à transmettre.

4.2.1 Contraintes imposées par le standard

Pour définir l'ordre de la supertrame, il nous faut considérer les obligations d'une telle communication concernant la transmission de la trame balise et la période avec contention (CAP) (cf fig. 2).

Dans notre étude nous considérons le pire des cas. Les données composant la trame balise dépendent en partie du niveau applicatif, que nous ne contrôlons pas. Par conséquent nous utiliserons une trame balise de taille maximale (133 octets). La période sans contention est contrôlée, quant à elle, par le coordinateur du réseau et est donc considérée égale à la taille minimale autorisée par le standard (440 symboles soit 220 octets pour le cas considéré).

Il est alors possible de déterminer l'ordre de la supertrame minimum SO_{mini} (1) répondant à cette contrainte en fonction du nombre de slots, CFP_{slots} , que l'on souhaite rendre disponible pour la période CFP :

$$SO_{\text{mini}} = \left\lceil \log_2 \left(\frac{a\text{MinCAPLength} + \text{Beacon}_{\text{max}}}{a\text{BaseSlotDuration} \times (a\text{NumSuperframeSlots} - CFP_{\text{slots}})} \right) \right\rceil \quad (1)$$

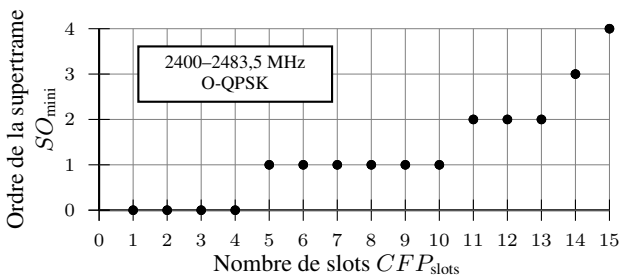


Figure 4: Ordre minimal de la supertrame en fonction du nombre de slots à allouer aux réservations GTS.

La figure 4 représente cette contrainte pour le choix de l'ordre de la supertrame. Il est donc possible de déterminer une valeur minimale de SO à satisfaire pour répondre aux exigences minimales imposées par le standard. Par ailleurs, si nous voulons autoriser la communication d'appareils au travers de réservations GTS, il nous

faut de plus caractériser l'ordre de la supertrame contraint par l'utilisation du réseau.

4.2.2 Contraintes liées à l'usage des réservations GTS

Les données transmises au sein d'une réservation GTS par une station sont incluses dans un nombre entier N de slots. On propose de déterminer le nombre de slots requis pour la communication d'une quantité de données, $Data$ octets, par une station. L'équation (2) correspond au nombre N de slots requis pour une communication sans acquittement. Cette fonction considère la fragmentation minimale des données. Sa représentation est donnée à la figure 5.

$$N = \left\lceil \frac{Data + (\text{Entêtes} + LIFS) \times \left\lceil \frac{Data}{MSDU} \right\rceil}{a\text{BaseSlotDuration} \times 2^{SO}} \right\rceil \quad (2)$$

Les paramètres $Entêtes$, $LIFS$ et $MSDU$ sont définis par la spécification du standard IEEE 802.15.4. Dans notre cas d'étude, $Entêtes = 23$ octets, $LIFS = 20$ octets et $MSDU = 104$ octets.

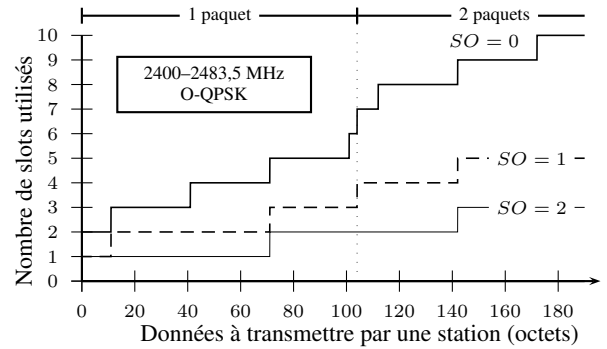


Figure 5: Utilisation des slots en fonction des données à transmettre.

Il est donc possible de déterminer le nombre total de slots, $CFP_{\text{slots}} = \sum_i N_i$, nécessaire pour la communication de l'ensemble des stations du réseau en fonction de l'ordre de la supertrame.

5. Applications numériques

Afin de mettre en évidence la capacité des réseaux IEEE 802.15.4 à satisfaire des contraintes de communication temps réel, nous nous proposons de mettre en évidence quelques limitations induites par le protocole.

Considérons un exemple simple composé du seul échange entre un coordinateur et une station. Cette station émet 1 octet de données à chacune de ses mises à jour. Le rafraîchissement de cette information auprès du coordinateur ne peut s'effectuer, dans le meilleur des cas, que toutes les 15,36 ms (cf fig. 5 et 4. $SO = 0$, $CFP_{\text{slots}} = 2$). Il est donc impossible de satisfaire des

applications industrielles nécessitant des temps de cycle inférieurs à **15,36 ms**.

D'autre part, du fait de la limitation, par le standard, du nombre de réservations GTS dans un cycle, il est impossible de considérer dans une même supertrame la communication de plus de sept stations.

D'autres limitations peuvent apparaître dès lors que l'on considère une application industrielle. Nous nous intéressons, maintenant, à une application industrielle composée d'un réseau de six stations. L'une d'elle n'a que le rôle de coordinateur du réseau, alors que les cinq autres ont pour tâche d'échanger des informations avec le coordinateur comme indiquées dans la table 1.

Station	Données émises	Données reçues	Période
n°1	1 octet	-	40 ms
n°2	8 octet	-	40 ms
n°2	-	16 octets	100 ms
n°3	4 octets	-	60 ms
n°4	8 octets	4 octets	60 ms
n°5	16 octets	-	100 ms

Table 1: Données échangées sur le réseau entre les stations 1 à 5 et le coordinateur.

Dans le cas de cette application, il nous faut considérer 7 réservations GTS d'au moins 1 slot chacune car une réservation est associée à une station et à un sens de communication (réception ou émission). Dès lors on peut constater, à l'aide des figures 4 et 5, que les communications de cette application sont satisfaites si l'on choisit au minimum $SO = 1$. En effet pour $SO = 1$, l'émission ou la réception de 16 octets nécessitent la réservation de 2 slots contrairement aux 5 autres messages contenus dans un seul slot, $CFP_{\text{slots}} = 5 \times 1 + 2 \times 2 = 9$ ce qui correspond à une valeur $SO_{\text{mini}} = 1$. Ces paramètres permettent un temps de cycle $T_{\text{cycle}} = 30,72$ ms.

Dans le cas où la communication nécessite l'emploi d'acquittements, non détaillé dans cet article, les paramètres correspondants entraînent un temps de cycle double $T_{\text{cycle}} = 61,44$ ms car alors $SO_{\text{mini}} = 2$.

Cette application industrielle pourra donc faire l'emploi d'un réseau de type IEEE 802.15.4 ($T_{\text{cycle}} \leq 40$ ms) à la condition de ne pas nécessiter d'acquittements pour sa communication. La caractérisation des paramètres de l'application joue ainsi un rôle important sur la capacité du réseau à satisfaire ou non un cas industriel.

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons évalué les performances temporelles du standard IEEE 802.15.4 et nous montrons l'existence d'un certain nombre de limites fortes, concernant notamment les temps de cycle et le nombre d'échanges compris dans un cycle de communication.

Tout cela implique que l'utilisation actuelle de IEEE 802.15.4 et notamment de sa principale application, Zigbee, ne peut être réellement considérée que pour

des applications peu contraintes par le temps comme, par exemple, la collecte d'informations pour de la supervision ou de la e-maintenance [2]. Il est par contre *difficile* d'envisager des applications de contrôle/commande qui nécessitent des contraintes de temps réel plus fortes.

L'utilisation de IEEE 802.15.4 pour des applications sensibles nécessitent *au minimum* la reconsidération des valeurs imposées par la spécification voire l'adaptation de certaines règles du standard.

Références

- [1] The Industrial Wireless Book. <http://wireless.industrial-networking.com>.
- [2] DYNAMITE — Dynamic Decisions in Maintenance, 2005–2009. Europe.
- [3] G. Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18:535–547, Mar. 2000.
- [4] J. A. Gutiérrez, E. H. J. Callaway, and R. L. J. Barrett. *Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4*. IEEE Standards Information Network, 2003.
- [5] IEEE Computer Society. IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE std 802.15.4-2003). In *IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks— Specific requirements — Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, pages i–305. IEEE, 8 Sept. 2006.
- [6] R. Kapoor, M. Kazantzidis, M. Gerla, and P. Johansson. Multimedia support over bluetooth piconets. In *Wireless Mobile Internet*, Proceedings of the first workshop on Wireless mobile internet, pages 50–55, 2001.
- [7] A. Koubâa, M. Alves, B. Nefzi, and Y.-Q. Song. Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for Time-Critical Events in Wireless Sensor Networks. In *In Proc. of the Workshop of Real-Time Networks (RTN 2006)*, July 2006.
- [8] A. Koubâa, M. Alves, and E. Tovar. Energy and delay trade-off of the GTS allocation mechanism in IEEE 802.15.4 for wireless sensor networks. In *Wiley Journal of Communication Systems, special issue on Energy-Efficient Network Protocols and Algorithms for Wireless Sensor Networks*, pages 1099–1131. John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
- [9] N. Krommenacker and V. Lecuire. Building Industrial Communication Systems based on IEEE 802.11g wireless technology. In *10th IEEE International Conference on Emerging Tech. and Factory Automation*, volume 1, pages 71–78, Sept. 2005.
- [10] L. Lo Bello, M. Collotta, O. Mirabella, and T. Nolte. Approaches to support real-time traffic over bluetooth networks. In J. Kaiser, editor, *Proceedings of the 4th international workshop on Real-Time Networks (RTN'05)*, pages 47–50, Palma de Mallorca, Balearic Islands, Spain, 5 July 2005.
- [11] I. Ramachandran, A. K. Das, and S. Roy. Analysis of the Contention Acces Period of IEEE 802.15.4 MAC. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 3(1), mar 2007.