

# Modélisation logicielle/matérielle par chaînes de Markov absorbantes des protocoles pour les réseaux de capteurs sans-fil

Faycal AIT AOUDIA, Matthieu GAUTIER, Olivier BERDER

Université de Rennes 1 - Laboratoire IRISA, 6 rue de Kerampont, 22 300, Lannion, France

faycal.ait-aoudia@irisa.fr, matthieu.gautier@irisa.fr, olivier.berder@irisa.fr

**Résumé** – Afin de minimiser l'énergie des réseaux de capteurs sans fil, de nombreux protocoles d'accès ont été proposés. Le protocole influence directement la fiabilité, la latence, le débit et l'efficacité énergétique de la communication et ses performances sont liées à la cible matérielle sur laquelle il est exécuté. Nous proposons dans ce papier une modélisation hybride des protocoles qui tient compte du protocole lui-même et de son implémentation matérielle. Cette modélisation est basée sur des Chaînes de Markov absorbantes, permet de calculer des expressions analytiques de la consommation d'énergie, de la latence et de la fiabilité, et peut donc être utilisé pour comparer différents schémas et différentes cibles matérielles. Des mesures expérimentales ont été effectuées pour valider la modélisation proposée.

**Abstract** – In order to improve energy efficiency of wireless sensor networks, a lot of protocols have been proposed. The protocol directly affects the reliability, latency, throughput and energy efficiency of the communication and its performance is related to the hardware target on which it is run. We propose in this paper a hybrid modeling that takes into account the protocol itself and its hardware implementation. This modeling is based on absorbing Markov chains, allows to calculate analytical expressions of the energy consumption, the latency and the reliability, and therefore can be used to compare different schemes and hardware targets. Experimental measurements were performed to validate the proposed modeling.

## 1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans de nombreuses applications pour la santé, l'environnement et l'industrie. Un point clef dans leur conception est le choix du protocole d'accès au canal, qui joue un rôle essentiel pour la fiabilité, la latence, le débit et l'efficacité énergétique (la communication étant généralement une des tâches les plus consommatrices d'énergie). Il existe de nombreux protocoles proposés dans la littérature [1] et il est donc difficile de choisir et de paramétrer le protocole le plus approprié à une application spécifique ou de comparer de nouveaux protocoles avec l'état de l'art. Des modèles analytiques génériques sont nécessaires pour étudier la performance de différents schémas, caractériser leurs limites fondamentales et optimiser leurs paramètres en tenant compte des contraintes matérielles.

Dans cet article, une modélisation générique des protocoles MAC est présentée. Le modèle repose sur les Chaînes de Markov absorbantes (AMC) [2] et permet d'exprimer analytiquement la consommation d'énergie, la latence et la fiabilité. Les chaînes de Markov (MC) ont déjà été utilisées pour la modélisation des protocoles, en particulier pour étudier des protocoles MAC spécifiques [3] et des conceptions inter-couches [4]. Le but de cette modélisation est d'être générique en proposant un outil analytique pour la modélisation de différents protocoles afin d'explorer l'espace de leurs paramètres et de les comparer entre eux. De plus, en combinant approche analytique et mesures en temps réel, des surcoûts matérielles qui se produisent

lors de la communication peuvent être incluses dans le modèle. Cette modélisation hybride a été appliquée au protocole PW-MAC (Predictive-Wakeup MAC) [5] et validée par des mesures expérimentales.

La modélisation par AMC des protocoles est présentée dans la Section 2 et les expressions analytiques des performances sont exprimées dans la Section 3. La Section 4 montre la prise en compte des surcoûts logiciels et matériels pour PW-MAC et montre la validité du modèle.

## 2 Modélisation des protocoles

Un protocole MAC donné est modélisé par une MC décrivant son fonctionnement. Une modélisation typique est illustrée par la Figure 1a. L'état "standby" (STDBY) est l'état du protocole lorsqu'il ne reçoit ou ne transmet pas de paquet. La réception d'un paquet est classiquement précédée d'une étape d'écoute périodique du canal pour les protocoles à échantillonnage de préambule ou de réception d'une balise. Cette étape correspond à l'état R-WUP (*receive wake-up*) de la Figure 1a et peut conduire à la réception d'un paquet. Nous appelons respectivement *processus de transmission* et *processus de réception* les procédures définies par le protocole pour transmettre et recevoir un paquet. Chacun de ces procédés consiste en une ou plusieurs étapes élémentaires, e.g. la transmission d'une balise, la transmission d'une trame de données, la réception d'un accusé de réception (ACK). Certaines étapes peuvent éventuellement réussir ou échouer, e.g. la réception d'un ACK peut

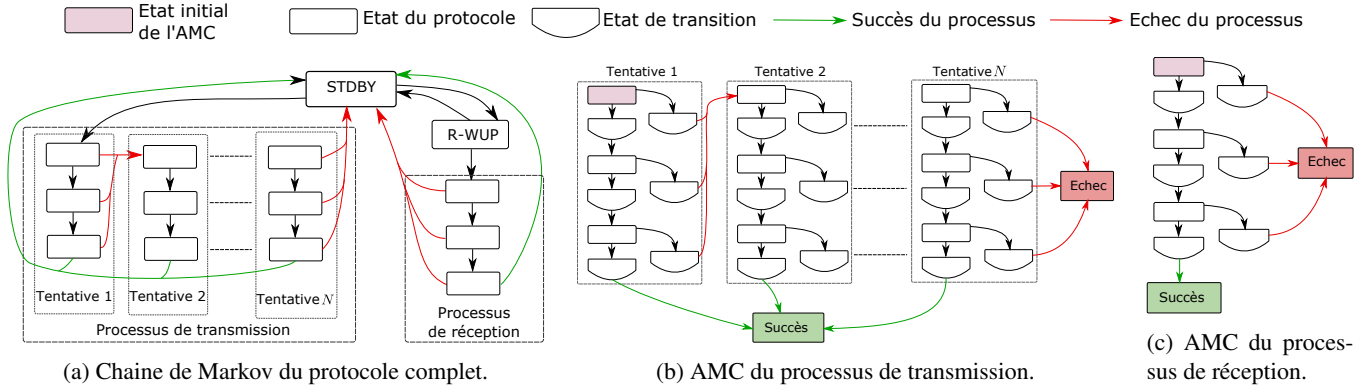


FIGURE 1 – Modélisation générique d'un protocole avec des Chaines de Markov.

échouer en raison d'une interférence. Lors de la transmission d'un paquet, un nombre  $N \in \mathbb{N}^*$  de tentatives est généralement autorisé. L'échec d'une tentative conduit soit à une nouvelle tentative, soit à l'échec du processus de transmission pour la dernière tentative.

Dans l'approche proposée, les processus d'émission et de réception sont modélisés individuellement par deux AMC illustrées par les Figures 1b et 1c. Ces AMC sont extraites de la MC modélisant l'ensemble du protocole et construites en définissant deux états d'absorption notés "Succès" et "Echec". Trois sortes d'états sont définis pour construire une AMC : les états du protocole, les états de transition et les états finaux. Les états du protocole sont définis par le protocole lui-même. Cependant, pour évaluer correctement la consommation d'énergie et la latence du protocole et du matériel, des états de transition, n'influant pas sur le comportement du protocole, sont nécessaires pour modéliser le coût d'énergie et de latence des transitions entre les états. Les états finaux sont les états "Succès" et "Echec". Tous les états sauf les derniers sont transitoires. Dans le reste de ce papier, l'indice "t" et "r" sont associés aux objets mathématiques (AMC, matrice, vecteur, scalaire) liés respectivement au processus de transmission et de réception de paquets. L'indice "b" est utilisé lorsque l'objet se réfère indifféremment aux deux processus.

Soit  $C_b$  une AMC modélisant un processus de transmission/réception et  $\mathbf{P}_b$  sa matrice de transition définie par :

$$\mathbf{P}_b = \begin{matrix} & e_1 & \cdots & e_{M_b} & s & f \\ \begin{matrix} e_1 \\ \vdots \\ e_{M_b} \\ s \\ f \end{matrix} & \begin{pmatrix} p_{1,1} & \cdots & p_{1,M_b} & p_{1,s} & p_{1,f} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{M_b,1} & \cdots & p_{M_b,M_b} & p_{M_b,s} & p_{M_b,f} \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}, \quad (1)$$

avec  $M_b$  le nombre d'états transitoires  $e_i, i \in \{1, \dots, M_b\}$ ,  $s$  l'état final "Succès",  $f$  l'état final "Echec",  $p_{i,j} \in [0, 1]$  la probabilité de transition de l'état transitoire  $e_i$  vers l'état transitoire  $e_j$ ,  $p_{i,s}$  et  $p_{i,f}$  les probabilités de transition de l'état transitoire  $e_i$  vers les états finaux  $s$  et  $f$  respectivement. Comme  $s$  et  $f$  sont des états absorbants, les probabilités de transition  $p_{s,s}$  et  $p_{f,f}$  sont égales à 1.

En appliquant des résultats classiques de la théorie des AMC,

la matrice  $\mathbf{P}_b$  peut être réécrite (sans perte de généralité) [2] :

$$\mathbf{P}_b = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_b & \mathbf{R}_b \\ \mathbf{0}_{2 \times M_b} & \mathbf{I}_2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

avec  $\mathbf{Q}_b$  une matrice  $M_b \times M_b$ ,  $\mathbf{R}_b$  une matrice  $M_b \times 2$ ,  $\mathbf{I}_2$  une matrice identité de taille 2 et  $\mathbf{0}_{2 \times M_b}$  une matrice nulle  $2 \times M_b$ . La matrice fondamentale de  $C_b$  est [2] :

$$\mathbf{N}_b = (\mathbf{I}_{M_b} - \mathbf{Q}_b)^{-1}. \quad (3)$$

L'entrée  $ij$  de  $\mathbf{N}_b$ , notée  $n_{i,j}$ , est le nombre moyen de fois que la chaîne passe dans l'état transitoire  $e_j$  si elle a commencé dans l'état transitoire  $e_i$  avant d'être absorbée. Sans perte de généralité, l'état initial de  $C_b$  est  $e_{i_0}$  avec  $i_0 \in \{1, \dots, M_b\}$ , i.e.  $e_{i_0}$  est l'état initial des processus de transmission ou de réception. Ainsi, uniquement la ligne  $i_0$  de  $\mathbf{N}_b$  est utile. C'est un vecteur de taille  $M_b$  noté  $\mathbf{n}_b$ .

### 3 Modèles analytiques des performances

Probabilités de succès de transmission/réception d'un paquet : Pour évaluer la fiabilité d'un protocole, la probabilité qu'un paquet soit transmis ou reçu avec succès (i.e. que  $C_b$  est absorbée par l'état final  $s$ ) est considérée. Soit la matrice de probabilité d'absorption, notée  $\mathbf{B}_b$  et de taille  $M_b \times 2$ , l'élément  $b_{i,j}$  de  $\mathbf{B}_b$  est la probabilité que la chaîne soit absorbée par l'état absorbant  $j$ , si elle démarre dans l'état  $e_i$ . La matrice  $\mathbf{B}_b$  peut être calculée par [2] :

$$\mathbf{B}_b = \mathbf{N}_b \mathbf{R}_b. \quad (4)$$

L'état initial étant  $e_{i_0}$ , seule la ligne  $i_0$  est utile et le vecteur de taille 2 correspondant à cette ligne est noté  $\mathbf{b}_b$ . L'élément  $b_{b,s}$  de ce vecteur correspond à la probabilité que la chaîne  $C_b$  est absorbée par l'état final  $s$ .  $b_{b,s}$  est calculé par :

$$b_{b,s} = \sum_{j=1}^{M_b} n_{i_0,j} p_{j,s}. \quad (5)$$

Coût énergétique de transmission ou de réception d'un paquet :

Soit  $\mathbf{e}_b$  le vecteur des coûts énergétiques, i.e. le vecteur de taille  $M_b$  dont l'élément  $i$  est le coût énergétique induit au protocole quand il passe dans l'état transitoire  $e_i$ , le coût énergétique moyen de transmission ou de réception d'un paquet est le

produit scalaire de  $\mathbf{n}_b$  et de  $\mathbf{e}_b$  :

$$\bar{e}_b = \mathbf{n}_b \cdot \mathbf{e}_b. \quad (6)$$

Dans (6),  $\mathbf{n}_b$  est lié au fonctionnement du protocole, alors que  $\mathbf{e}_b$  est lié à l'application et au matériel, *i.e.* durée des trames et consommation du transmetteur radio.

Nombre moyen de tentatives de transmission : Soit  $\mathbf{c}$  le vecteur de taille  $M_t$  dont l'élément  $i$  vaut 1 si  $e_i$  est l'état initial d'une tentative dans la modélisation AMC du processus de transmission, 0 sinon. Alors, le nombre moyen de tentatives de transmission notés  $\bar{a}$  est donné par :

$$\bar{a} = \mathbf{n}_t \cdot \mathbf{c}. \quad (7)$$

Notons que  $\bar{a}$  ne tient pas compte de l'issue ("Succès" ou "Echec") du processus de transmission.

Latence du processus de transmission d'un paquet : Un vecteur des coûts de latence noté  $\mathbf{l}_b$  et de taille  $M_b$  est défini. L'élément  $i$  de  $\mathbf{l}_b$  est la latence induite au protocole quand il passe dans l'état transitoire  $e_i$ . Le raisonnement pour calculer (6) n'est pas applicable au calcul de la latence de transmission, car il était indépendant de l'issue du processus. En effet, la latence correspond à la durée de transmission d'un paquet quand le processus de transmission réussit. Ainsi, la *matrice fondamentale conditionnelle* notée  $\mathbf{N}_{|a,t}$  est introduite comme la matrice dont l'élément  $n_{|a,i,j}$  est le nombre moyen de fois que la chaîne est dans l'état transitoire  $e_j$  si elle a commencé dans l'état  $e_i$  et qu'elle a été absorbée par l'état  $a \in \{s, f\}$ . Il a été montré dans [6] que :

$$n_{|a,i,j} = \frac{b_{j,a}}{b_{i,a}} n_{i,j}. \quad (8)$$

Finalement, comme l'état initial du processus de transmission est  $e_{i_0}$ , seul le vecteur de la ligne  $i_0$ , noté  $\mathbf{n}_{|s,t}$ , est utile. Ainsi, la latence moyenne pour la transmission d'un paquet est :

$$\bar{l}_t = \mathbf{n}_{|s,t} \cdot \mathbf{l}_t, \quad (9)$$

avec  $\mathbf{l}_t$  le vecteur des coûts de latence du processus de transmission.

Puissance moyenne consommée : L'équation (6) permettant le calcul du coût énergétique moyen d'une transmission  $\bar{e}_t$  et d'une réception  $\bar{e}_r$  d'un paquet, la puissance moyenne consommée  $\bar{P}_C$  due au protocole de communication peut être calculée par :

$$\begin{aligned} \bar{P}_C = & \bar{a} \lambda_r \bar{e}_r + (\lambda_g + b_{t,s} \lambda_r) \bar{e}_t + \lambda_w e_w + \left(1 - \bar{a} \lambda_r (\mathbf{n}_r \cdot \mathbf{l}_r) \right. \\ & \left. - (\lambda_g + b_{t,s} \lambda_r) (\mathbf{n}_t \cdot \mathbf{l}_t) - \lambda_w l_w \right) P_{SBY}, \end{aligned} \quad (10)$$

sous l'hypothèse qu'un nœud retransmet tous les paquets qu'il reçoit avec succès. Dans (10),  $\lambda_r$  et  $\lambda_g$  sont respectivement le taux moyen de réception et de génération de paquets en local.  $b_{t,s}$  est la probabilité qu'un paquet soit transmis avec succès et se calcule avec (5).  $\lambda_w$  est le taux de réveil en réception.  $e_w$  et  $l_w$  sont respectivement le coût énergétique et la durée d'un unique réveil en réception. Les produits scalaires  $\mathbf{n}_r \cdot \mathbf{l}_r$

et  $\mathbf{n}_t \cdot \mathbf{l}_t$  correspondent respectivement aux durées de réception et de transmission d'un paquet, indépendamment de l'issue du processus. Enfin,  $P_{SBY}$  est la puissance consommée par le nœud quand le protocole est dans l'état STDBY.

Le premier terme correspond à la puissance consommée lors de la réception de paquets, le second celle consommée lors de la transmission. Le troisième terme permet de tenir compte de la puissance consommée lors de réveils en réception (écoute périodique, transmission d'une balise, ...). Enfin, le dernier terme est la puissance consommée quand le nœud est endormi.

## 4 Modélisation hybride d'un protocole pseudo-asynchrone

Le protocole PW-MAC contrôle l'activité du transmetteur radio afin que celui-ci soit en veille la plupart du temps et mis en marche périodiquement afin de vérifier les paquets arrivant. Dans PW-MAC, la communication est initiée par le récepteur, chaque nœud envoie régulièrement une balise indiquant qu'il est prêt à recevoir. Il écoute ensuite le canal afin de recevoir les paquets arrivant. Si aucun paquet n'est détecté, le nœud se remet en veille. L'intervalle de temps entre deux envois de balise est calculé à l'aide d'un générateur pseudo-aléatoire, évitant aux nœuds voisins de se réveiller en même temps et ce de manière répétée. Un nœud apprend l'intervalle de réveil de ses récepteurs potentiels et se réveille juste avant l'envoi une balise planifiée quand il souhaite envoyer un paquet. Après réception de la balise, il envoie la trame de données, puis écoute la trame ACK. Le détail de la modélisation de ce protocole est donné dans [6], nous nous intéressons ici à la prise en compte des surcoûts matériels et logiciels.

### 4.1 Prise en compte des surcoûts

Le modèle proposé nécessite que les coûts énergétique  $\mathbf{e}_b$  et de latence  $\mathbf{l}_b$  soit parfaitement connus. De plus, lorsqu'un protocole est implémenté sur une plate-forme, des surcoûts peuvent se produire à cause de configurations matérielles et logicielles pour changer la radio. . .

Des microbenchmarks ont été réalisés afin de mesurer précisément ces coûts énergétique et de latence (y compris les surcoûts) pour la transmission et la réception de paquets et pour un réveil périodique. Les résultats sont présentés sur la Figure 2 pour le processus de transmission. Ces mesures ont été effectuées à l'aide de l'analyseur de puissance Keysight N6705B et la plate-forme PowWow [7]. PowWow est une plate-forme de réseaux de capteurs modulaire utilisant un transmetteur radio CC1120 de Texas Instrument (TI) qui consomme 34 mA pour une transmission à +10 dBm et 22 mA en réception. Sur la Figure 2, les différentes étapes du processus de transmission peuvent être vues. Cette figure montre que les surcoûts matériels et logiciels sont introduits au début et à la fin du processus et entre la transmission et la réception des trames.

Ces coûts additionnels ont été pris en compte par l'ajout d'états de transition dans l'AMC du processus de transmission.

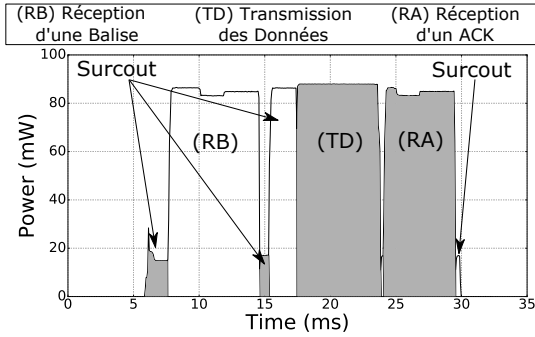


FIGURE 2 – Puissance consommée pour l’envoi d’un paquet avec PW-MAC.

Ainsi, d’après la Figure 2, l’AMC est composée de 3 états liés au protocole (réception d’une balise, transmission des données et réception de l’ACK) et de 4 états modélisant les surcoûts matériels et logiciels. L’approche “naïve” consiste à modéliser uniquement les états liés au protocole, alors que l’approche “hybride” considère les surcoûts.

Pour calculer les coûts théoriques énergétique et de latence, on connaît la taille  $S$  d’une trame en bits et son débit  $R$  de transmission. La latence de transmission/réception d’une trame (balise, données et ACK) est donc :

$$l = \frac{S}{R}. \quad (11)$$

Et l’énergie pour transmettre/recevoir une trame est :

$$e = \frac{S}{R} P_C, \quad (12)$$

avec  $P_C$  la puissance consommée par le nœud (sa valeur change si le nœud est en transmission ou en réception).

## 4.2 Résultats expérimentaux

Pour illustrer l’importance de considérer ces surcoûts, des mesures de consommation d’énergie et de latence ont été réalisées pour différentes valeurs moyennes de  $\lambda_w$ . Les résultats sont comparés aux estimations analytiques obtenues en utilisant le modèle proposé et les approches “naïve” et “hybride” pour le paramétrage des vecteurs de coût. La Figure 3 montre les deux estimations ainsi que les mesures obtenues. Les résultats montrent que le modèle proposé est précis pour la latence avec les deux approches “naïve” et “hybride”. Toutefois, pour la consommation d’énergie, l’approche “hybride” est nettement plus précise que l’approche “naïve”. Ces résultats montrent l’intérêt de l’approche “hybride” pour obtenir une estimation précise avec le modèle proposé.

## 5 Conclusion

Ce papier présente une modélisation générique des protocoles pour les réseaux de capteurs sans fil. Cette modélisation utilise les chaînes de Markov absorbantes et permet d’exprimer analytiquement la consommation d’énergie, la latence et

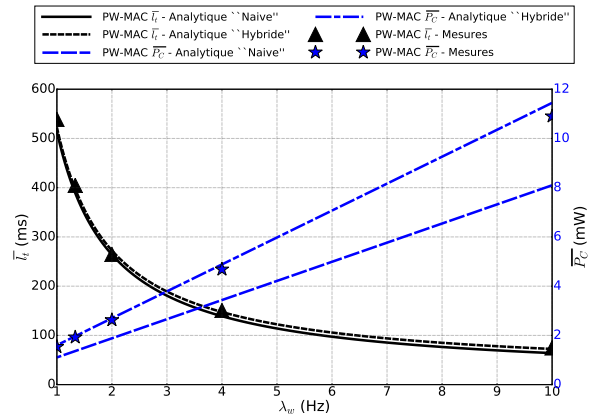


FIGURE 3 – Comparaison des approches “naïve” et “hybride” pour le paramétrage des vecteurs de coûts.

la fiabilité tout en prenant en compte les surcoûts matériels engendrés par l’implémentation du protocole. Cet outil permet notamment de comparer différents protocoles, l’intérêt de l’utilisation des wake-up radio a été montré dans [8].

## Références

- [1] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. W. Mutka, and N. Xi, “The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks : A Survey,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 101–120, January 2013.
- [2] C. M. Grinstead and J. L. Snell, *Grinstead and Snell’s Introduction to Probability*. Chance Project, 2006.
- [3] Q. Zhao and L. Tong, “A Dynamic Queue Protocol For Multiaccess Wireless Networks With Multipacket Reception,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 6, pp. 2221–2231, November 2004.
- [4] Y. Wang, M. Vuran, and S. Goddard, “Cross-Layer Analysis of the End-to-End Delay Distribution in Wireless Sensor Networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 20, no. 1, pp. 305–318, February 2012.
- [5] L. Tang, Y. Sun, O. Gurewitz, and D. B. Johnson, “PW-MAC : An Energy-Efficient Predictive-Wakeup MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” in *IEEE INFO-COM*, April 2011, pp. 1305–1313.
- [6] F. Ait Aoudia, M. Gautier, M. Magno, O. Berder and L. Benini, “A Generic Framework for Modeling MAC Protocols in Wireless Sensor Networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, no. 99, pp. 1 – 12, 2016.
- [7] O. Berder and O. Sentieys, “PowWow : Power Optimized Hardware/Software Framework for Wireless Motes,” in *International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS)*, February 2010, pp. 1–5.
- [8] F. Ait Aoudia, M. Magno, M. Gautier, O. Berder and L. Benini, “Analytical and Experimental Evaluation of Wake-up Receivers based protocols,” in *IEEE Global Communications Conference (Globecom 2016)*, pp. 1 – 6, december 2016.