

# Etude de l'impact énergétique de l'algorithme d'accès au médium pour un réseau de capteurs sans fil industriel

Nicolas FOURTY, Adrien VAN DEN BOSSCHE, Thierry VAL

LATTIS EA4155-SCSF, Université de Toulouse,  
1 Place Georges Brassens, BP 60073, 31703 Blagnac Cedex, France  
*fourty@iut-blagnac.fr, vandenbo@iut-blagnac.fr, val@iut-blagnac.fr.*

**Résumé**— Les réseaux de capteurs sans fil visent bien souvent des durées de vie importantes où il est généralement admis que la durée de vie du capteur est la même que celle de la pile. Les spécificités des réseaux de capteurs permettent d'envisager de longues périodes de sommeil où le nœud peut économiser de l'énergie et maximiser ainsi sa propre durée de vie. Dans ce cadre, nous avons mené une étude globale sur l'estimation de la durée de vie d'un nœud capteur : cette étude prend en compte les caractéristiques de la méthode d'accès au médium, celles du *transceiver* et du microcontrôleur du nœud, ainsi que le comportement de la pile. Cette étude a notamment montré que le fait de solliciter la pile par des courants fortement variables dégrade considérablement sa capacité, donc, la durée de vie du nœud et, par conséquent, celle du réseau tout entier. Nos conclusions mettent en évidence l'importance du choix de l'algorithme d'accès au médium, face au coût énergétique qu'il engendre, notamment s'il est basé sur une écoute importante du médium.

**Mots-clés**— Réseaux sans fil, réseaux industriels, économie d'énergie, méthodes d'accès au médium.

## I. INTRODUCTION

Généralement, lorsqu'ils concernent une application embarquée, les réseaux sans fil doivent être conçus pour économiser l'énergie. La ressource est limitée – piles, batteries, photo-voltaïque... – et l'énergie est considérée, à juste titre, comme une ressource rare qu'il faut économiser.

Si l'on considère un élément du réseau dans son intégralité, des sources de dépenses énergétiques importantes peuvent être localisées à de multiples emplacements. La surenchère de la complexité protocolaire, par exemple, en est une cause significative. Dans ce contexte, les travaux visant l'économie d'énergie par la simplification protocolaire, sont nombreux [1, 2, 3]. La combinaison IEEE 802.15.4/ZigBee en est un exemple pertinent et largement connu [4, 13] : les objectifs visés sont bel et bien la mise en œuvre d'un protocole simple et efficace, dont l'ensemble tient sur les quelques 64ko de code d'un microcontrôleur 8 bits – ce qui limite fortement la complexité des protocoles. Sur cette technologie très prisée des réseaux capteurs (WSN, *Wireless Sensor Networks*), la consommation énergétique est plus importante en réception qu'en émission, ce qui constitue une certaine révolution dans la conception des protocoles à économie d'énergie. Les débits sont généralement faibles (de l'ordre du kbits/s). Les topologies couramment rencontrées sont variées : arbre, étoile, maillées, etc. Dans tous les cas, il est nécessaire de prévoir des protocoles associés à ces topologies, permettant l'existence de périodes de sommeil organisées entre les différentes entités du réseau.

Cependant, si l'objectif de minimiser les dépenses énergétiques est fort louable, il est plus important encore de parvenir à maîtriser ces dépenses, par exemple pour modifier dynamiquement le comportement du protocole si l'énergie se raréfie. Dans le domaine des réseaux de capteurs par exemple, il est souvent considéré que la santé d'un nœud du réseau est moins importante que la santé du réseau dans sa globalité puisque l'application visée dépend généralement du réseau dans son ensemble. De ce fait, il est important de savoir quantifier l'énergie résiduelle de tout élément du réseau. Grâce à cette donnée, il est possible de prévenir les pannes, d'optimiser le routage pour éviter les nœuds en fin de vie, etc. [5]. Cependant, l'obtention de cette information n'est pas triviale, surtout dans le cas où, comme pour IEEE 802.15.4/ZigBee, le nombre de cycles de charge/décharge de la batterie est limité sur la durée de vie de l'entité communicante. Pire, il est même possible que le nœud soit recyclé dès que la source d'énergie est tarie (durée de vie de l'entité = durée de vie de la batterie). Dans cette catégorie d'équipements embarqués jetables, une estimation basée sur un étalonnage grâce à plusieurs cycles de charges/décharges n'est donc pas envisageable : il faut trouver d'autres méthodes pour obtenir cette information.

Dans la littérature, on trouve plusieurs travaux qui proposent des modèles quantifiant l'énergie restante d'un nœud [6, 7] en considérant le comportement de la pile ou de la batterie comme linéaire. Ainsi, il n'est pas rare de lire que, lorsqu'un nœud effectue 5 transmissions successives, le modèle met à jour l'énergie du nœud en la réduisant par l'équivalent de 5 fois l'énergie d'une transmission. Ces modèles considèrent que la décharge d'une batterie se fait d'une manière linéaire, ce qui n'est pas réaliste, nous le verrons plus bas.

Après cette introduction, nous rappellerons brièvement le contexte de l'étude et le matériel mis en œuvre. En effet, nous avons développé un prototype suffisamment ouvert pour qualifier avec précision l'énergie demandée par chaque action intentée sur le médium. Les mesures, ainsi que les résultats obtenus, seront présentés dans le troisième chapitre. A cette occasion, deux protocoles simples seront présentés et analysés sous l'angle de la dépense énergétique. Dans le quatrième chapitre, nous présenterons l'étude menée sur la qualification du comportement des piles *Lithium* utilisées sur le prototype ; nous mettrons en évidence le comportement « non linéaire » évoqué plus haut, et l'erreur engendrée par une telle hypothèse. Enfin, nous conclurons ce travail sous forme de recommandations pour la conception de protocoles économes en énergie.

## II. CONTEXTE DE L'ETUDE

### A. Les solutions IEEE 802.15.4 disponibles sur le marché

Au cours de nos investigations sur les réseaux de capteurs basés sur IEEE 802.15.4, nous avons été rapidement confronté au faible nombre de *modems* compatibles avec cette norme de WPAN. Nous avons identifié plusieurs fabricants de puces tels que FREESCALE, TEXAS, MAXSTREAM qui associent ou non le *modem* à un microcontrôleur permettant de piloter ce dernier. Les solutions IEEE 802.15.4 proposées par les constructeurs sont composées d'un *modem* supportant la couche physique et d'un microcontrôleur supportant les couches supérieures, et donc, pilotant la couche physique. Il est ainsi relativement simple de modifier la couche MAC, comme dans le cadre de cette étude. Les deux composants peuvent être, ou non, regroupés sous le même boîtier.

Les choix technologiques faits par les fabricants de *modems* ont des conséquences sur les caractéristiques électriques et temporelles, ainsi que sur les aspects du protocole qui sont pris en charge. Ainsi la solution FREESCALE 13213 associe un microcontrôleur FREESCALE MC9S08GB60 et un *modem* 1321x au sein d'un *system in package*, alors que la solution TEXAS comme le CC2430 [8] associe un microcontrôleur de cœur 8051 et un *modem* CC2420. Enfin, la solution TELIT ZB2400, utilisée dans le réseau du projet OCARI [9], reprend le MC9S08GB60 de FREESCALE avec un *modem* CC2420 de TEXAS. Toutes ces solutions utilisent également un bus SPI pour la communication entre le *modem* et le microcontrôleur.

Nous retrouvons sur l'ensemble de ces solutions la plupart des fonctionnalités décrites dans le standard [10], et notamment ce qui nous intéresse, c'est-à-dire les modes *Doze*, *Idle* et *Hibernate* qui permettent d'endormir et de réveiller rapidement le couple *modem*/microcontrôleur. Ces mécanismes sont la clé de l'économie d'énergie proposée par IEEE 802.15.4 et vont pouvoir être pilotés par le microcontrôleur. Ainsi, Freescale et son module 13213 permettent, grâce à des primitives simples, de gérer et de piloter la partie *modem*. Nous allons nous baser sur ce jeu de primitives appelé SMAC (*Simple Media Access Controller*) pour caractériser l'impact des algorithmes d'accès au médium au travers des modes économiques en énergie sur la durée de vie d'un nœud capteur.

Il est également à noter que les solutions CC2430 et 13213, intègrent deux dispositifs permettant de surveiller la tension de la pile disponible :

- un premier dispositif permet d'alerter le microcontrôleur en cas de franchissement d'un seuil programmable. Ce premier dispositif, minimaliste, permet typiquement de programmer l'envoi d'alertes sur l'imminence d'un arrêt du nœud,

- un second dispositif, plus élaboré, permet d'avoir une connaissance précise et absolue de la tension fournie par la pile. A l'aide de ce dispositif, il est possible de mener des études sur l'énergie résiduelle, si toutefois on tient compte du type du support de stockage (accumulateur NiMh, Li-ion, piles Lithium, etc.). Il est difficile d'appréhender comment ces différentes technologies chimiques vont réagir en fonction des cycles de fonctionnement établis par les protocoles économiques en énergie.

### B. Notre nœud prototype

Bien que plusieurs solutions IEEE 802.15.4 soient disponibles sur le marché, nous avons tenu à développer en laboratoire un nœud prototype respectant les exigences suivantes :

- carte minimaliste, impliquant un nombre très limité de composants, pour favoriser au maximum l'économie d'énergie (notamment, pas d'UART ni port USB),
- alimentation directe par deux piles grand public (format AA) donc pas de perte énergétique dans un dispositif de régulation de tension,
- possibilité de séparation des alimentations des composants présents sur la carte : microcontrôleur, *modem*, capteur, etc.
- dispositif de mesure intégré de la tension des piles pour une « auto-mesure » à la demande,
- présence d'un capteur quelconque (choix d'un capteur de température),
- système totalement ouvert : possibilité de reprogrammation totale des protocoles, y compris la couche MAC,
- présence de borniers pour des applications futures (E/S numériques ou analogiques, PWM...)
- taille relativement réduite (futurs intégrations).

Notre prototype se base finalement sur une solution FREESCALE ZRD01 [11], incluant le microcontrôleur MC9S08GB60 et le *modem* 13192, tout deux évoqués plus haut. Pour plus de souplesse, le ZRD01 a été soudé sur une carte fille, tandis que la carte mère regroupe les borniers, le capteur de température et le dispositif de mesure de la tension de la pile. Un port de programmation BDM, ainsi que de nombreux points de mesures, sont également disponibles, comme on peut le voir sur la figure 1.

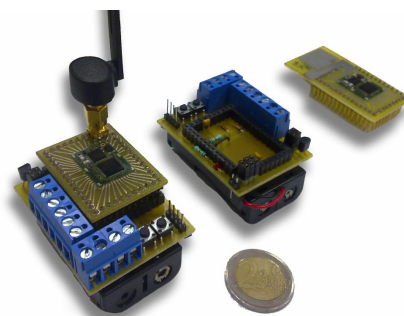


Figure 1. Notre nœud prototype

## III. CARACTERISATION DE NOTRE NŒUD PROTOTYPE

Afin de pouvoir débiter l'étude de la consommation de notre carte prototype, plusieurs mesures ont été réalisées dans l'objectif de confirmer ou d'infirmer les données communiquées par les constructeurs [11], que l'on retrouve largement dans la littérature scientifique.

Deux campagnes de mesures ont été menées : une première sur le courant consommé par chacun des constituants de notre carte prototype, pour chaque état protocolaire ; une seconde campagne a été réalisée pour caractériser le temps nécessaire pour effectuer telle et telle opération (capture, émission, réception, traitement, etc.).

### A. Rappel sur les notions d'énergie et puissance

Pour mémoire, l'énergie est l'intégrale de la puissance sur un temps donné. De plus, la puissance est égale au produit tension courant, soit :

$$P = \frac{dE}{dt}, \text{ ou } E = \int P \cdot dt$$

$$P = U \cdot I, \text{ soit } E = \int U \cdot I \cdot dt$$

Dans notre cas, nous considérons que la tension reste la même sur toute l'expérience. Cette hypothèse simplificatrice reste pertinente compte tenu de la source d'énergie utilisée, comme nous le verrons plus bas.

De plus, nous considérons également que le courant est lui aussi constant, mais seulement sur le temps passé dans l'état considéré. En effet, il existe un courant continu mesurable pour chaque état ; de ce fait, la formule précédente est simplifiée :

$$E = P \cdot \Delta t, \text{ soit } E = U \cdot I \cdot \Delta t$$

### B. Qualification temporelle/énergétique de notre prototype

Les mesures qui suivent ont été réalisées sur le prototype, avec divers instruments : micro-ampèremètre et oscilloscope numérique pour les mesures de courants, et analyseur d'états logiques pour les mesures temporelles. Sur le plan de la consommation en courant, les résultats sont présentés dans le Tableau I et la Figure 2. Sur le plan temporel, les données sont présentées dans le Tableau II.

Sur la Figure 2, la courbe 1 représente la consommation du microcontrôleur, la courbe 2 celle du composant radio. Comme nous pouvons le remarquer, on ne constate pas de pointes de courant notables lors des changements d'états.

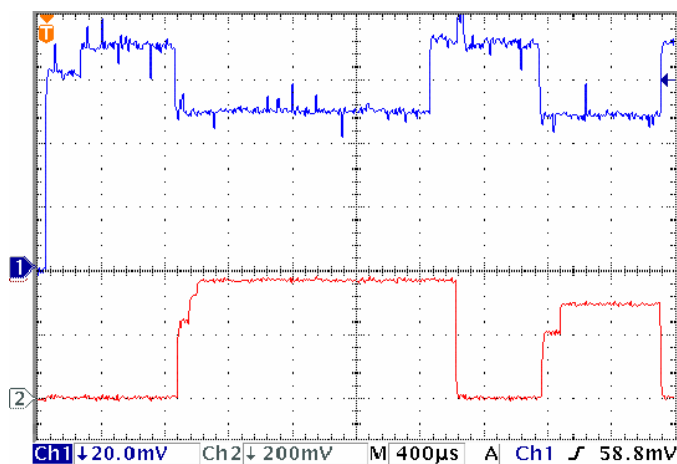


Figure 2. Visualisation de l'évolution temporelle des courants

TABLEAU I

CONSOMMATION EN COURANT DE CHAQUE ELEMENT DE LA CARTE POUR CHAQUE ETAT

Etat	µC	Modem	Capt. T°	Capt. pile	LED
TX (0 dBm)	3.5 mA	30 mA			
TX (3.6 dBm)	3.5 mA	37 mA			
RX	3.5 mA	38 mA			
Capture T°	5 mA	1.3 mA	120 µA		
Capture pile	5 mA	1.3 mA		1 mA	
LED ON	5 mA	1.3 mA			700 µA
Veille			140 µA		

Remarque importante : sur notre matériel, que ce soit pour l'émission ou la réception de données sur la radio, le temps nécessaire est de 48.36µs par octet transmis ou reçu ; en effet, les données sont d'abord transmises du microcontrôleur au composant radio par un bus SPI cadencé à 500kbit/s (16µs/o) ; les données sont ensuite émises sur l'air, dans un second temps seulement, au débit spécifié par IEEE 802.15.4 de 32µs/o (250kbit/s).

L'ensemble de ces données nous permet de proposer des modèles énergétiques simples, en fonction des états mis en œuvre par le protocole et le temps imparti pour chaque état.

TABLEAU II

TEMPS NECESSAIRE POUR REALISER CHAQUE ACTION, INCLUANT LE TEMPS DE TRAITEMENT CPU

Action	Temps nécessaire
Capture T°	20 µs
Capture pile	20 µs
Réveil modem	310 µs
Réveil microcontrôleur	235 µs
Mise en veille modem et microcontrôleur	570 µs
Emission de $n$ octets	$(423+48.36*n)$ µs
Réception de $n$ octets	$(289+48.36*n)$ µs

### C. Exploitation des données à travers un protocole simple

Dans le cadre de la première étude menée, nous avons considéré un protocole simple. Il permet à un capteur d'envoyer périodiquement (toutes les 2,5 secondes) ses données à un nœud, dont le récepteur est activé en permanence. Ce protocole est décrit comme tel :

- réveil du module,
- sollicitation des capteurs : température ambiante, tension de la pile,
- constitution d'une trame de 19 octets contenant le préambule 802.15.4, un champ longueur de trame, une adresse, les données issues des capteurs, un incrément puis un FCS. L'émission sur le médium se fait immédiatement, sans précaution particulière c'est à dire sans écoute avant émission,
- attente d'un acquittement, jusqu'à deux millisecondes, avec un crédit de deux répétitions (jusqu'à trois émissions)
- passage en veille pour 2,5 secondes.

Le choix de 2 ms pour le délai d'attente de l'acquittement a été déterminé expérimentalement comme optimal ; compte tenu du délai imposé par la communication sur le bus SPI, ce temps ne peut être plus court. L'acquittement implémenté reprend le format proposé par IEEE 802.15.4 (3 octets au niveau MAC, soit 11 octets sur le médium).

TABLEAU III

ENERGIE CONSOMMEE DANS CHAQUE ETAT DU PROTOCOLE ETUDIE

Etat	Temps imparti (ms)	Courant consommé (mA)	Energie (pour U= 3V) (µJ)	%
Emission DATA à 0 dBm (19 o)	1,341	33,5	134,85	9,28
Réception d'un ACK (11 o)	2	41,5	249	17,13
Maintien en veille	2500	0,14	1050	72,25
Mises en veille			15,22	1,05
Autres états			4,27	0,29
Total			<b>1453,3</b>	100%

Compte tenu des résultats obtenus et présentés dans la section précédente, nous sommes en mesure de calculer précisément l'énergie nécessaire à l'exécution de ce protocole

simple. Pour cela, nous procédons simplement par la somme des énergies consommées par chaque état, compte tenu du temps imparti pour faire aboutir chaque opération.

Nous avons jugé intéressant d'étudier les deux cas extrêmes, à savoir un cycle sans retransmission et un cycle avec deux retransmissions.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- pour un cycle sans retransmission (cas le plus favorable), l'énergie nécessaire est de 1,45 mJ, dont 1,05 mJ consommés par le maintien en veille (72,2%),
- pour un cycle avec deux retransmissions (cas le plus défavorable), l'énergie nécessaire est de 2,22 mJ, dont 1,05 mJ dédiées au maintien en veille (47,2%).

Il est clair (Figure 3) que le temps passé en réception augmente considérablement les besoins énergétiques.

Comme on peut le constater, le courant de veille, si petit soit il, implique tout de même une consommation de près de 72% de l'énergie totale sur un cycle sans retransmission.

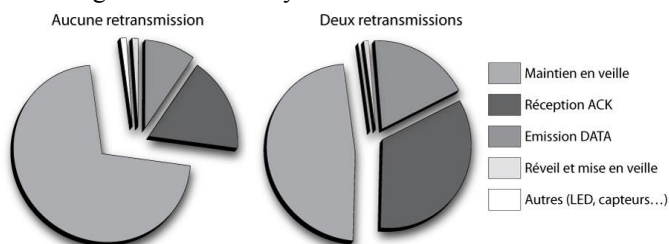


Figure 3. Répartition de l'énergie consommée sur un cycle, pour chaque état (sans retransmission / avec deux retransmissions)

#### D. Conclusion

A ce stade, nous avons évalué la quantité d'énergie demandée par un protocole simple, en fonction de mesures réelles effectuées sur notre prototype. Force est de constater que la mise en réception consomme beaucoup d'énergie, qui plus est, sur un temps nécessairement surdimensionné. En effet, si les retransmissions augmentent la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement du protocole, les écoutes à répétition, nécessairement surdimensionnées, l'augmentent encore plus.

A présent, nous allons chercher à estimer la durée de vie du capteur, compte tenu des caractéristiques de la source d'énergie, ici, deux piles lithium de type AA.

#### IV. CARACTERISATION DE LA DECHARGE DE PILE

Dans le chapitre précédent, nous avons clairement établi la quantité d'énergie demandée pour parvenir à exécuter un cycle de fonctionnement d'un nœud capteur. Dès lors, il est tentant de calculer, compte tenu de la quantité d'énergie contenue dans la pile, le nombre de cycles qui pourront être exécutés avant d'épuiser totalement cette source d'énergie, l'hypothèse étant que la pile contient une quantité d'énergie connue et invariable quelque soit la façon dont on utilise cette énergie. (Décharges continues, par salves ou cycles...).

Afin de pouvoir déterminer si cette hypothèse est réaliste, nous avons soumis quelques piles à plusieurs types de décharges, certaines artificiellement provoquées, continues ou variables, d'autres provoquées par un capteur réel. Comme évoqué plus haut, toutes l'étude porte sur des piles Lithium de référence *Energizer Ultimate Lithium AA L91*. L'ensemble de ces expérimentations est décrit dans ce qui suit.

#### A. Présentation du dispositif de décharge

Un dispositif de décharges artificielles a été mis en œuvre : la pile en qualification est sollicitée par une résistance de charge (R) qui est activée, à la demande, par un circuit commandé par un microcontrôleur. Cette sollicitation est paramétrable, en continu ou par cycle, selon les besoins. Ce même microcontrôleur va également observer la tension aux bornes de cette pile et envoyer périodiquement la valeur à un PC connecté par un bus USB, comme le montre la Figure 4. Une fois les données reçues par le PC, elles sont traitées puis stockées jusqu'à épuisement total de la pile.

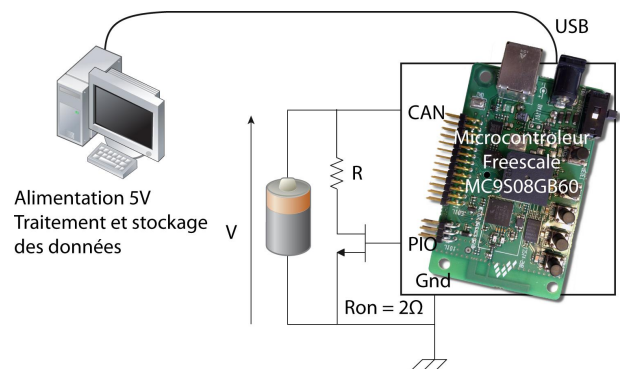


Figure 4. Protocole de décharge des piles

#### B. Décharges continues

Dans un premier temps, plusieurs décharges continues (ie. à courant constant) ont été effectuées. Bien entendu, un mode de décharge constant est peu réaliste, compte tenu des protocoles visés où le nœud passe régulièrement en veille ; cependant, ce type de décharge permet d'obtenir rapidement de premiers résultats servant de référence.

Plusieurs courants de décharge ont été testés : 10, 15, 30, 100, 200, 300 et 550 mA. La Figure 5 présente les résultats obtenus sur trois courants : 10, 30 et 200 mA. On trouvera en abscisses le temps de décharge normalisé par le courant de décharge et en ordonnées la tension générée par la pile, évoluant dans le temps. Grâce à ces mesures, on peut aisément estimer la capacité de la pile, lors de l'effondrement de la tension.

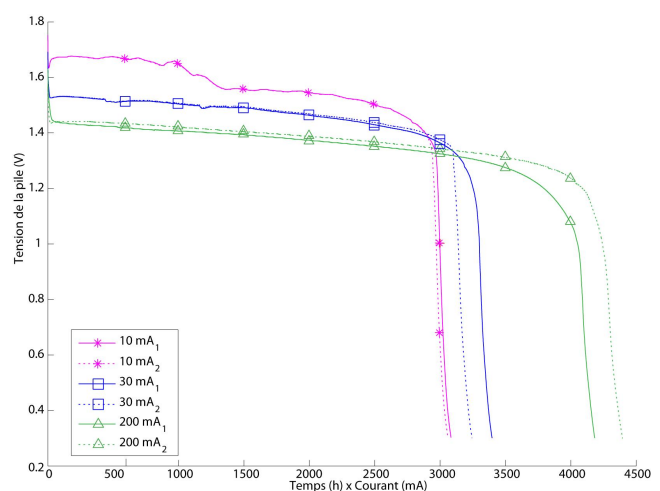


Figure 5. Résultats pour une décharge constante

Toutes les manipulations ont systématiquement été menées deux fois et se sont révélées reproductibles. Le nombre de

manipulations a tout de même été limité par le coût engendré (une pile Lithium usée par mesure) et le temps nécessaire pour effectuer la mesure dans son intégralité (310 heures pour un courant de 10mA). Sur toute la gamme de courants testés, toutes les mesures effectuées ont permis d'obtenir une capacité entre 3000 et 3500 mA.h. Le courant de 200 mA a permis de mieux exploiter la pile, puisque la capacité a été déterminée autour de 4300 mA.h.

De plus, on peut noter que la tension est relativement constante sur toute la durée de la manipulation, comme cela avait été supposé en §III.A.

Pour plus de rigueur, nous avons cherché à établir clairement la notion de capacité de la pile. Plusieurs critères sont envisageables : par exemple, le document de référence de la pile [12] utilise le critère noté C0.9 défini comme le franchissement d'un seuil fixe de 0,9 V. Nous avons également retenu trois critères supplémentaires :

- le franchissement d'un seuil fixe de 1,3 V, désigné par C1.3,
- le franchissement d'un seuil correspondant à une chute de 10% de la tension initiale stabilisée (C10),
- le franchissement d'un seuil correspondant à une chute de 15% de la tension initiale stabilisée (C15).

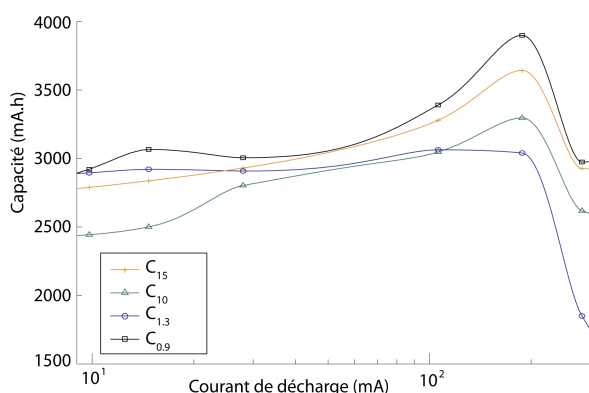


Figure 6. Comparaison des critères de détermination de la capacité de la pile

Comme on peut le constater sur la Figure 6 représentant la capacité de la pile en fonction des courants de décharge et selon les quatre critères présentés, on peut considérer que C0.9, C10 et C15 donnent des résultats sensiblement identiques sur les plages de courant qui nous concernent (<100mA).

Après ces premières mesures réalisées sur des décharges continues, nous avons cherché à savoir si la pile qualifiée présente le même comportement lorsqu'elle est sollicitée par des courants variables. Pour ce faire, nous avons mené une campagne de mesures avec des courants variables.

### C. Décharges variables obtenues par cycles

Nous l'avons évoqué plus haut, les protocoles mis en œuvre fonctionnent généralement par cycle, typiquement : réveil, attente d'une balise de resynchronisation (*beacon*), émission de la donnée, acquittement puis mise en veille. Afin d'être le plus fidèle possible, nous avons donc procédé à des décharges de pile par cycle, composé d'un courant constant pendant quelques dizaines ou centaines milliseconde reproduisant la période de travail du capteur, suivi d'une période, plus longue, où le courant est très faible reproduisant la veille du capteur.

Deux cas ont été étudiés, ils sont présentés sur la figure 7. La période du cycle a été fixée à 2 secondes dans les deux cas, les durées de l'état « travail » ont été choisies à la fois pour être comparés à l'étude précédente, mais aussi comme réalistes :

- 200 ms à 100 mA puis 1.8 s à 100  $\mu$ A (10% du cycle). Ce cas est assez représentatif d'un capteur, par exemple IEEE 802.15.4, en mode suivi de beacon,
- 1 s à 100 mA puis 100  $\mu$ A le reste du temps (50% du cycle). Ce cas évoque plutôt un routeur, avec un cycle d'activité de 50%.

Sur la Figure 7, on retrouve également les cas constants 10 et 100 mA, pour comparaison.

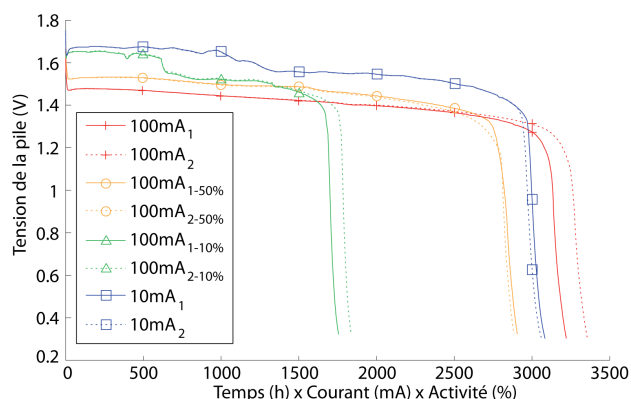


Figure 7. Résultats pour une décharge par cycle

Cette étude permet d'établir plusieurs constatations :

1. Si l'on compare les cas [100 mA constant] et [100 mA 50%], on notera une légère dégradation de la capacité de la pile. En effet, de 3300 et 3400 mA.h pour le premier cas, on obtient 2900 mA.h pour le second (mesures reproductibles). Cette constatation nous apprend que la pile, si elle est sollicitée par des décharges variables, perd quelque peu de sa capacité (ici, 13,3% environ)
2. Si l'on compare les cas [100 mA constant] et [100 mA 10%], le phénomène évoqué est à nouveau constaté, mais dans des proportions beaucoup plus importantes. En effet, dans le second cas, la capacité de la pile mesurée est comprise entre 1750 mA.h et 1800 mA.h, soit une perte de 47% de capacité.
3. Enfin, il est intéressant de comparer les cas [10 mA constant] et [100 mA 10%] qui présentent un même courant moyen. Là encore, on constate que la variabilité de la décharge a un impact très négatif sur la capacité totale (43% de pertes).

### D. Conclusion

Il est donc intéressant de constater que la capacité de la pile dépend fortement de la manière dont elle est sollicitée. Sur l'ensemble des mesures effectuées, pour une même période de cycle (ici deux secondes), plus le temps de sollicitation est court, plus l'effondrement de la capacité de la pile est important.

La Figure 8 permet de constater que cette évolution semble logarithmique ; la régression calculée est la suivante :

$$y = -0.205 \ln(x) - 0.0032$$

Cette supposition sera confirmée dans un futur proche par des mesures qui sont en cours de réalisation.

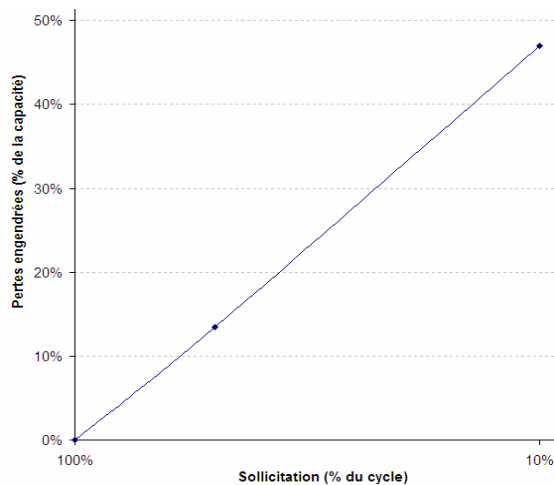


Figure 8. Pertes engendrée sur la capacité en fonction de la sollicitation de la pile

## V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude menée comporte de nombreuses manipulations et permet, selon nous, de tirer plusieurs conclusions.

Premièrement, sur le prototype qualifié, nous avons pris le parti d'utiliser une couche physique IEEE 802.15.4, sans la modifier. De ce fait, cette couche physique a été considérée telle qu'elle, comme un consommateur d'énergie donné. Cependant, l'entité MAC, située juste au dessus de la couche physique, peut être considérée comme l'ordonnanceur des activités de cette couche gourmande en énergie ; aussi, la méthode d'accès au médium a toutes les cartes en main pour gérer convenablement, ou non, une économie d'énergie, plus ou moins stricte.

Dans ce contexte, il nous semble important de conclure sur la réelle nécessité de limiter temporellement les états de réception. Un protocole MAC gourmand en réception impliquera des dépenses énergétiques importantes, d'autant plus que, comme cela a été évoqué plus haut, les périodes de réceptions sont nécessairement surdimensionnées pour des problèmes de synchronisation entre émetteurs et récepteurs.

De plus, même si c'est une perspective de recherche qui concerne plus l'électronicien, il est fondamental d'optimiser au maximum le courant consommé pendant les périodes de somnolence. En effet, sur les deux études menées, nous avons constaté que plus de la moitié de l'énergie contenue initialement contenue dans la pile sert à maintenir le module en veille. Si on ramène le courant consommé en veille, si faible soit-il, au temps de cycle, celui est le plus gourmand sur notre nœud prototype.

Enfin, les mesures réalisées sur les piles nous indiquent clairement que la tentation qui consiste à calculer le nombre de cycles du protocole qui pourraient être exécutés en fonction de la capacité de la pile (considérée jusqu'alors comme constante) aurait donné des résultats tout à fait inexacts ; en effet, l'étude a montré que la capacité de la pile varie fortement en fonction de la sollicitation qui est demandée (jusqu'à 50% dans le pire cas). Une régression logarithmique a été calculée à partir des mesures réelles mais, compte tenu du faible nombre de mesures et de l'écart

important des courants, il n'est pas raisonnable, dans l'immédiat, de mettre en relation les deux modèles présentés : le modèle de décharge et le modèle du nœud. De plus, d'autres mesures sont en cours, notamment celles réalisées sur des cycles plus courts (5% et 2%) et sur des courants plus faibles (30mA) ; le temps nécessaire à leur aboutissement est long !

Les perspectives de ce travail sont nombreuses : dans un futur proche, de nouvelles mesures sur la caractérisation de la pile viendront étoffer les résultats actuels : la régression logarithmique sera, ou non, confirmée ; dans tous les cas, le modèle actuel gagnera en précision. De plus, de nouvelles mesures concernant des courants plus faibles et des périodes de cycle différentes sont également prévues. Ces résultats sont très attendus pour pouvoir élargir le champ d'application du modèle de décharge des piles.

Enfin, sur la caractérisation du capteur, l'étude d'autres méthodes d'accès au médium est prévue. Par exemple, une application de notre caractérisation à CSMA/CA, qui constitue une référence dans le domaine des WSN basés sur IEEE 802.15.4, nous permettrait de comparer les prochaines méthodes d'accès au médium conçues à cette MAC de référence.

## REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a pu être mené au sein du laboratoire LATTIS EA4155, grâce au projet ANR OCARI « Optimisation des Communications Adhoc pour les Réseaux Industriels » [9].

## REFERENCES

- [1] Rahim Kacimi, *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, Septembre 2009
- [2] Guoliang Xing, Xiaorui Wang, Yuanfang Zhang, Chenyang Lu, Robert Pless, and Christopher Gill, *Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks*, ACM Transactions on Sensor Networks, 1(1) : 36-72, 2005
- [3] Tijs van Dam, Koen Langendoen, *An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks*, 1st international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'03), pages 171-180, New York, NY, USA, 2003
- [4] Andrew Wheeler, *Commercial Applications of Wireless Sensor Networks Using ZigBee*, IEEE Communications Magazine, Avril 2007
- [5] S. Mahfoudh, P. Minet, *Performance evaluation of the SERENA algorithm to Schedule Router Nodes Activity in wireless ad hoc and sensor networks*, AINA 2008, IEEE 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Ginowan, Japon, Mars 2008.
- [6] D. Panigrahi, C. Chiasserini, S. Dey, R. Rao, A. Raghunathan, and K. Lahiri, *Battery life estimation of mobile embedded systems*, 14th International Conference on VLSI Design, 2001.
- [7] C. Ma, Z. Zang, and Y. Yang, *Battery-aware scheduling in wireless mesh networks*, Mobile Networks and Applications, vol. 13, Avril 2008
- [8] CC2430, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2430.pdf>
- [9] K. Alagha, M. Bertin, T. Dang, A. Guitton, P. Minet, T. Val, J. Viollet, *Which wireless technology for Industrial Wireless Sensors Network? The development of OCARI technology*, IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 56, n°10, Octobre 2009
- [10] IEEE, IEEE 802.15.4-2006, *Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate WPANs*, 2006
- [11] Freescale Semiconductor, *ZigBee Reference Design (ZRD01) documentation & applications notes*, 2004
- [12] [http://data.energizer.com/PDFs/L91ULT\\_EU.pdf](http://data.energizer.com/PDFs/L91ULT_EU.pdf)
- [13] *ZigBee Specification-Document 053474r17*, <http://www.zigbee.org>.