

# **Protocoles MACs dédiés aux Réseaux de Capteurs Sans Fils**

**Kenza Bouzergan**  
**5ISS**

**4/12/2023**

# **Sommaire:**

## **Introduction**

A. Les couches MACs pour les réseaux de capteurs sans fil

A.1. Optimisation Énergétique dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil : Enjeux et Défis de la Couche MAC

A.2. Les différentes méthodes d'accès aux canaux

B. Le développement de protocoles MAC adaptés aux réseaux de capteurs sans fil.

B.1. Le protocole CAN-like

- Description du protocole
- Gestion des problèmes de transmission
- Consommation d'énergie

B.2. Le protocole Sensor-MAC

- Description du protocole
- Gestion des problèmes de transmission
- Consommation d'énergie

B.3. Le protocole Wise-MAC

- Description du protocole
- Gestion des problèmes de transmission
- Consommation d'énergie

B.4. Le protocole Energy & Rate MAC

- Description du protocole
- Gestion des problèmes de transmission
- Consommation d'énergie

## **Conclusion**

## **Introduction :**

La couche de contrôle d'accès au support physique (Media Access Control - MAC) occupe une position cruciale au sein du modèle OSI, étant située dans la partie inférieure de la couche liaison. Responsable de la gestion des interactions entre les utilisateurs et le support physique, la couche MAC assume des fonctions clés telles que la synchronisation des débuts et fins de trames, la détection des erreurs de transmission, la sélection et le filtrage des trames pertinentes, la régulation de l'accès au canal partagé, ainsi que l'instauration d'un accès équitable et optimal pour les utilisateurs du réseau. Ces attributions définissent la portée de la couche MAC, telle que spécifiée dans le standard 802 [1].

En tant qu'interface cruciale au sein de la structure du modèle OSI, la couche MAC joue un rôle fondamental dans l'optimisation des performances et la préservation de l'intégrité des communications au sein du réseau. En assurant la synchronisation précise des trames, la surveillance proactive des anomalies de transmission, et la mise en œuvre de mécanismes de filtrage et de régulation, la couche MAC contribue de manière significative à l'efficacité opérationnelle et à la qualité des échanges au sein du réseau.

## **A. Les couches MACs pour les réseaux de capteurs sans fil**

### **A.1. Optimisation Énergétique dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil : Enjeux et Défis de la Couche MAC**

Il est crucial de développer des protocoles de couche MAC [2] adaptés aux réseaux de capteurs sans fil en prenant en compte des caractéristiques telles que la latence, le débit, la bande passante, l'équité et, surtout, la consommation énergétique. Les réseaux de capteurs sans fil sont constitués de nombreux nœuds répartis dans une zone et ont pour fonction de collecter et de transmettre des données. Un réseau multi-sauts est créé lorsque ces nœuds interagissent via des canaux sans fil, permettant à un ou plusieurs nœuds d'envoyer des données. La gestion de l'évolutivité face aux variations de la taille du réseau, telles que l'apparition, la disparition ou le déplacement des nœuds, doit être prise en compte dans la conception des protocoles MAC.

Les communications entre les nœuds consomment de l'énergie, et certaines caractéristiques de la couche MAC peuvent gaspiller de l'énergie.

Les capteurs sans fil fonctionnent sur des piles ou des batteries, et il est souvent difficile de remplacer ou de recharger ces batteries. Il est crucial de comprendre les principales sources de gaspillage énergétique, telles que la collision des paquets, qui entraîne des retransmissions coûteuses, l'écoute clandestine, qui se produit lorsqu'un nœud capte des paquets qui ne lui sont pas destinés et l'overhearing, qui se produit lorsqu'un nœud écoute inutilement pour intercepter un trafic qui ne lui est pas destiné. De plus, l'envoi et la réception de paquets de contrôle et la transmission de paquets de données moins pertinents augmentent la consommation d'énergie.

## **A.2. Les différentes méthodes d'accès aux canaux**

Frequency Division Multiple Access (FDMA) [3] est l'une des procédures d'accès multiple analogiques les plus courantes. Elle divise la bande de fréquence en canaux de largeur égale, attribuant à chaque conversation une fréquence différente. Les avantages de FDMA résident dans la réduction du débit d'informations grâce à des codes numériques efficaces, ce qui permet d'augmenter la capacité. Cependant, les inconvénients incluent une capacité fixe par canal, des bandes de garde entraînant un gaspillage de capacité, et des filtres à bande étroite augmentant les coûts matériels.

Time Division Multiple Access (TDMA) [4] est une technique plus complexe, exigeant une synchronisation précise entre l'émetteur et le récepteur. Elle attribue cycliquement à chaque station mobile une fréquence pour une utilisation exclusive pendant une période donnée. Les avantages de TDMA résident dans la flexibilité des débits (multiples créneaux horaires pouvant être attribués à un utilisateur) et la possibilité de prendre en charge des trafics à débit variable. Cependant, les inconvénients comprennent des taux élevés nécessitant une égalisation complexe, une nécessité de temps de garde, et une consommation d'énergie accrue.

Code Division Multiple Access (CDMA) [4] diffère considérablement du multiplexage en fréquence et en temps. Il donne à un utilisateur un accès total à la bande passante pendant toute la durée. Les avantages de CDMA comprennent une capacité souple, une utilisation efficace des ressources radio et la possibilité de transmission en rafales. Cependant, les inconvénients incluent le besoin d'une sélection soignée de la longueur du code, une nécessité de synchronisation temporelle et une augmentation de la consommation d'énergie avec un contrôle précis de la puissance.

Le protocole CSMA (Carrier Sense Multiple Access) est largement utilisé dans les réseaux de communication pour contrôler l'accès au support. Son principe fondamental est de déterminer si le canal de communication est disponible avant d'émettre des données. Lorsqu'un nœud souhaite transmettre des informations, il écoute d'abord le canal pour voir s'il est occupé par d'autres transmissions. Le nœud commence à envoyer ses données si le canal est libre. Cependant, pour éviter les collisions, le nœud modifie sa transmission s'il détecte une activité sur le canal. En évitant les conflits lors de l'émission de données par plusieurs nœuds simultanément, le CSMA permet d'optimiser l'utilisation du support de communication. Le CSMA/CA (Avoidance of Collisions), qui est utilisé dans les réseaux sans fil, intègre des mécanismes supplémentaires pour prévenir les collisions, améliorant ainsi l'efficacité du protocole dans des environnements complexes.

En conclusion, chaque méthode (FDMA, TDMA, CDMA, CSMA) a ses propres avantages et inconvénients. FDMA est simple mais peut gaspiller de la capacité. TDMA offre une flexibilité accrue mais nécessite une synchronisation précise. CDMA permet une utilisation efficace des ressources mais nécessite une gestion complexe des codes et de la puissance. Le choix dépend des exigences spécifiques du système et de la balance entre avantages et inconvénients.

## **B. Le développement de protocoles MAC adaptés aux réseaux de capteurs sans fil.**

### **B.1. Le protocole CAN-like**

#### **Description du Protocole "CAN-like" :**

Le protocole "CAN-like" [5] est une adaptation novatrice du protocole MAC (Medium Access Control) CAN (Controller Area Network) destinée aux réseaux locaux sans fil. Dans sa conception, il conserve les principes fondamentaux du protocole CAN, tels que l'arbitrage basé sur la compétition et la priorité des nœuds, tout en les ajustant intelligemment pour répondre aux défis spécifiques posés par les réseaux sans fil. Le protocole se divise en plusieurs phases, notamment l'écoute du médium, la synchronisation, l'arbitrage, et l'émission des données. Il se caractérise par un mécanisme d'arbitrage bit à bit qui assure une gestion efficace des priorités entre les nœuds concurrents, favorisant ainsi une communication fiable et synchronisée.

#### **Gestion des Problèmes de Transmission :**

Le protocole "CAN-like" utilise le TDMA (Time Division Multiple Access) comme méthode d'accès multiple. Pour résoudre les problèmes potentiels de transmission dans les réseaux sans fil, le protocole "CAN-like" [5] met en œuvre plusieurs mécanismes ingénieux. L'une des caractéristiques clés est l'arbitrage basé sur la compétition, où les nœuds en compétition émettent des signaux de synchronisation et des bits de priorité. Ceci permet la détection précoce des conflits potentiels, minimisant ainsi les collisions. De plus, le protocole introduit une fenêtre d'ambiguïté pour compenser les décalages temporels liés à la propagation des signaux. Ces mécanismes combinés assurent une gestion robuste des problèmes de transmission, même dans des environnements sans fil sujets à des variations de délai et des interférences.

#### **Consommation en Énergie :**

En ce qui concerne la consommation en énergie, le protocole "CAN-like" [5] s'efforce de maintenir un équilibre entre la performance du réseau et l'efficacité énergétique. En introduisant des phases de compétition soigneusement synchronisées et en définissant des périodes d'observation, le protocole minimise les périodes d'activité non nécessaires, contribuant ainsi à réduire la consommation d'énergie. De plus, la conception précise des phases du protocole et la gestion rigoureuse des priorités visent à optimiser l'utilisation des ressources tout en répondant aux contraintes temporelles critiques des applications temps-réel. Ainsi, le protocole "CAN-like" se positionne comme une solution efficace, capable de fournir des performances fiables tout en maîtrisant la consommation d'énergie dans des environnements sans fil.

### **B.2. Le protocole Sensor-MAC**

#### **Description du Protocole :**

Le protocole Sensor-MAC (S-MAC) [6] est un protocole de contrôle d'accès au support (MAC) spécialement conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Son principal objectif est d'optimiser la consommation d'énergie des nœuds dans ces réseaux, qui fonctionnent généralement sur des batteries. S-MAC adopte une approche périodique d'écoute et de

sommeil. En d'autres termes, un nœud reste actif tant qu'il reçoit des paquets de données, et il passe en mode sommeil en éteignant sa radio lorsqu'il n'y a aucune activité. Cette périodicité est synchronisée entre les nœuds pour coordonner leurs cycles d'activité et de sommeil.

#### **Gestion des Problèmes de Transmission :**

S-MAC [6] aborde plusieurs problèmes liés à la transmission de données dans les réseaux de capteurs sans fil. Pour éviter les collisions, le protocole utilise une technique de détection de porteuse virtuelle par l'échange de paquets RTS/CTS (Request-to-Send/Clear-to-Send). Cela permet aux nœuds de détecter l'occupation du canal avant la transmission réelle, réduisant ainsi les risques de collisions. De plus, S-MAC utilise une signalisation en canal pour gérer le problème d'écoute indue. Les nœuds perturbateurs sont incités à passer en mode sommeil, contribuant ainsi à économiser l'énergie du réseau. Ces mécanismes combinés améliorent l'efficacité de la transmission des données tout en minimisant les conflits et la consommation d'énergie.

#### **Consommation d'Énergie :**

La consommation d'énergie est une préoccupation majeure dans les réseaux de capteurs sans fil, et S-MAC [6] vise à l'optimiser. Le protocole parvient à économiser de l'énergie en permettant aux nœuds de passer en mode sommeil pendant des périodes prédéfinies, réduisant ainsi la consommation d'énergie pendant les périodes d'inactivité. De plus, S-MAC optimise la consommation d'énergie pendant les périodes actives en utilisant des techniques telles que la synchronisation des réveils des nœuds et l'ajustement dynamique des temps de sommeil en fonction des conditions de trafic. Ces stratégies contribuent à prolonger la durée de vie des nœuds dans le réseau, améliorant ainsi la robustesse et l'efficacité globale du système de capteurs sans fil. D'après une étude [7] la consommation d'un nœud émetteur avec le protocole S-MAC consomme autour de 450 mJ.

### **B.3. Le protocole Wise-MAC**

#### **Description du Protocole :**

Le protocole WiseMAC [8] a été spécifiquement conçu pour fonctionner sur la puce système WiseNET développée au CSEM, intégrant un émetteur-récepteur radio FSK basse consommation (double bande 434 et 868 MHz), un microcontrôleur CoolRISC 8 bits à faible puissance, une mémoire vive, ainsi que des interfaces numériques et analogiques. La puce WiseNET fonctionne dans une plage de tension de 0,9 V à 1,5 V, permettant l'utilisation d'une seule pile alcaline bon marché comme source d'énergie. Le transceiver WiseNET vise une consommation ultra-basse de 2 mA en mode réception et une latence de mise sous tension courte de 800 µs.

WiseMAC utilise la technique d'échantillonnage du préambule pour minimiser l'énergie gaspillée pendant l'écoute inactive. Cette méthode implique d'échantillonner régulièrement le support pour détecter l'activité. Les nœuds du réseau échantillonnent le support avec la même période constante indépendamment du trafic réel. En cas d'occupation du support, le récepteur continue d'écouter jusqu'à ce qu'un paquet de données soit reçu ou jusqu'à ce que le support redevienne libre. À l'émetteur, un préambule de réveil est transmis avant chaque message pour assurer que le récepteur soit actif lorsque la partie utile du message arrivera.

**Gestion des Problèmes de Transmission :**

Pour gérer les collisions, WiseMAC [8] utilise une détection de porteuse non persistante avec un temps d'attente choisi comme un entier aléatoire multiplié par le temps de retournement du transceiver. Pour éviter les collisions entre deux nœuds ou plus souhaitant envoyer un paquet de données au même relais et au même instant d'échantillonnage cible, un préambule de réservation, qui est une forme de CSMA, de support de durée aléatoire est ajouté avant le préambule de réveil. En outre, pour atténuer l'effet du nœud caché, la portée de détection de porteuse est étendue au-delà de la portée d'interférence, au détriment de la capacité.

**Consommation d'Énergie :**

En ce qui concerne la consommation d'énergie, WiseMAC [8] maintient une table à jour avec le décalage de l'horaire d'échantillonnage de ses voisins directs. Les informations sur le décalage sont incluses dans chaque paquet d'accusé de réception. La durée du préambule de réveil est adaptée à la charge de trafic, assurant une faible surcharge de réveil en fonction des conditions de trafic. La période de préambule de réveil peut également être ajustée en cas de dérive d'horloge entre deux transmissions.

**B.3. Le protocole Energy & Rate-MAC****Description du Protocole :**

Le protocole ER-MAC [9] a été conçu pour répondre aux défis spécifiques des réseaux de capteurs sans fil, il se concentre sur la conception de protocoles de couche liaison énergétiquement efficaces pour les réseaux de capteurs, se distinguant des protocoles MAC traditionnels en se concentrant sur l'économie d'énergie plutôt que sur des aspects tels que l'équité ou le débit.

**Gestion des Problèmes de Transmission :**

Pour résoudre les problèmes de transmission, ER-MAC [9] utilise une approche TDMA (Time Division Multiple Access) qui élimine les collisions, réduit l'écoute inactive et minimise les surcharges liées aux paquets de contrôle. Le protocole utilise une méthode de "listen and sleep" périodique, où les nœuds ajustent leurs créneaux de transmission en fonction des niveaux d'énergie résiduels et des taux de flux de trafic de leurs voisins. Une phase de vote est déclenchée lorsque les nœuds deviennent critiques en raison d'une faible énergie. Pendant cette phase, les nœuds critiques s'engagent dans une élection locale pour déterminer un gagnant en fonction des niveaux de criticité, ajustant ainsi leurs créneaux de transmission. Les nœuds non critiques réduisent leurs créneaux, permettant aux nœuds critiques de dormir plus longtemps, équilibrant ainsi la consommation d'énergie.

**Consommation d'Énergie :**

Concernant la consommation d'énergie, ER-MAC [9] a été testé à l'aide du simulateur ns-2, montrant des améliorations significatives en termes d'économies d'énergie par rapport aux protocoles MAC existants. Le protocole adapte dynamiquement le nombre de créneaux de transmission en fonction de la criticité des nœuds, maximisant ainsi l'efficacité énergétique du réseau. Les résultats de simulation indiquent une augmentation de l'efficacité énergétique avec une légère augmentation de la charge de trafic, démontrant la capacité du protocole à s'adapter aux conditions changeantes du réseau.

## **Conclusion**

Ce document offre une vue d'ensemble et une comparaison entre quatre protocoles de communication utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil, à savoir WiseMAC, Energy & Rate-MAC (ER-MAC), CAN-like MAC et Sensor-MAC (S-MAC). Chacun de ces protocoles présente des caractéristiques spécifiques visant à répondre aux diverses exigences du marché des capteurs. Certains se distinguent par leur capacité à réaliser d'importantes économies d'énergie tout en intégrant des mécanismes de sécurisation adaptés aux défis de la communication. Cependant, il est crucial de souligner que ces avantages peuvent également entraîner des inconvénients potentiels, tels que la latence due aux phases de sommeil des protocoles S-MAC et ER-MAC. Une évaluation minutieuse est nécessaire pour choisir le protocole le mieux adapté à un environnement spécifique, en tenant compte des compromis potentiels associés à chaque solution.

## **Références :**



- [1] IEEE 802, Wikipedia [https://fr.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802](https://fr.wikipedia.org/wiki/IEEE_802)
- [2] Approche inter-couches pour l'économie d'énergie et la fiabilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil dédiés aux Applications Critiques de Surveillance, Ali Benzerbadj [https://www.researchgate.net/publication/328212038\\_Approche\\_inter-couches\\_pour\\_l'economie\\_d'energie\\_et\\_la\\_fiabilite\\_dans\\_les\\_Reseaux\\_de\\_Capteurs\\_Sans\\_Fil\\_dedies\\_aux\\_Applications\\_Critiques\\_de\\_Surveillance](https://www.researchgate.net/publication/328212038_Approche_inter-couches_pour_l'economie_d'energie_et_la_fiabilite_dans_les_Reseaux_de_Capteurs_Sans_Fil_dedies_aux_Applications_Critiques_de_Surveillance)
- [3] Glossaire des termes satellitaires : techniques d'accès multiple (FDMA, TDMA, CDMA) par Marcin Frackiewicz dans *Artificial Intelligence*, 25 juin 2023 <https://ts2.space/fr/glossaire-des-termes-satellites-techniques-dacces-multiple-fdma-tdma-cdma/#gsc.tab=0>
- [4] TDMA and CDMA in Mobile Communications Arun A Bhatji, A Thesis submitted to the Department of Electrical and Computer Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. <https://diginole.lib.fsu.edu/islandora/object/fsu%3A175931/datastream/PDF/view>
- [5] Xuan Hung Nguyen, Gérard Mouney. Spécification du protocole > pour la couche MAC des réseaux locaux sans fil. Ecole d'Été Temps Réel 2011 (ETR'11), Aug 2011, Brest, France. pp.195-198. fhal00656663f <https://hal.science/hal-00656663/document>
- [6] Energy Consumption Reduction in S-MAC Protocol for Wireless Sensor Network Author links open overlay panel. Jagriti a, D.K Lobiya b  
a. School of Computer & Systems Sciences, Jawaharlal Nehru University, Delhi-110067, India  
b. School of Computer & Systems Sciences, Jawaharlal Nehru University, Delhi-110067, India  
Available online 19 November 2018, Version of Record 19 November 2018.
- [7] Ye, Wei, J. Heidemann, et D. Estrin. « An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks ». In *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 3:1567-76 vol.3, 2002. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2002.1019408>.
- [8] WiseMAC, an ultra low power MAC protocol for the wiseNET wireless sensor network, A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, C. Enz and E. Le Roux Swiss Center for Electronics and Microtechnology (CSEM SA) [https://www.researchgate.net/publication/221091751\\_WiseMAC\\_an\\_ultra\\_low\\_power\\_MAC\\_protocol\\_for\\_the\\_wiseNET\\_wireless\\_sensor\\_network](https://www.researchgate.net/publication/221091751_WiseMAC_an_ultra_low_power_MAC_protocol_for_the_wiseNET_wireless_sensor_network)
- [9] Energy and Rate based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks Rajgopal Kannan Ram Kalidindi S. S. Iyengar Department of Computer Science Louisiana State University [https://www.researchgate.net/publication/220415861\\_Energy\\_and\\_rate\\_based\\_MAC\\_protocol\\_for\\_wireless\\_sensor\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/220415861_Energy_and_rate_based_MAC_protocol_for_wireless_sensor_networks)