

Choisir le bon protocole de réseau maillé sans fil pour l'Internet des objets industriel

Alors que les réseaux de capteurs sans fil constituent l'une des pierres angulaires de l'Internet des objets industriel, leur capacité à garantir une consommation réduite et une fiabilité similaire à celle des réseaux filaires devient primordiale. Linear explique ici quels sont les critères à prendre en compte pour choisir la bonne technologie réseau.

L'une des promesses les plus importantes de l'Internet des objets industriel (IIoT, Industrial Internet of Things) tient dans la capacité d'exploiter les données du monde réel récupérées par les réseaux de capteurs sans fil (WSN, Wireless Sensor Network) pour parvenir à une meilleure efficacité et rationaliser les activités. Les attentes en la matière sont nombreuses, comme le montrent les capteurs placés un peu partout dans les bâtiments, les rues, les usines, les tunnels et les ponts, les véhicules ou dans certains endroits isolés comme le long de pipelines et les stations météo. Toutes ces applications de l'Internet des objets industriel exigent toutefois que les WSN consomment le moins possible et garantissent une fiabilité similaire à celle d'un réseau câblé, et ce pour un large éventail de types et de tailles de réseau, et de débits.

Dans ce cadre, les réseaux maillés sans fil sont de mieux en mieux acceptés en raison de leur facilité à couvrir de vastes zones en utilisant des émetteurs/récepteurs radio de relativement faible consommation qui relaient des messages de nœud à nœud, et de leur capacité à maintenir une fiabilité élevée en utilisant des trajets et des canaux de rechange pour s'affranchir des interférences. Une technique de réseau maillé a particulièrement fait ses preuves sur le terrain et démontré qu'elle était capable des performances nécessaires pour la mise en œuvre de l'Internet des objets industriel. Il s'agit de la technologie à saut de canal et à synchronisation temporelle TSCH (Time Synchronized Channel Hop-

AUTEUR



Ross Yu, directeur marketing produit, Dust Networks Product Group, Linear Technology.

ping), mise au point par l'activité Dust Networks de Linear Technology et incorporée dans la norme industrielle WirelessHART. Les réseaux TSCH affichent typiquement une fiabilité de données supérieure à 99,999% et tous les nœuds sans fil, même ceux de routage, bénéficient d'une autonomie de plusieurs années avec de petites piles au lithium. Cependant, d'autres réseaux maillés utilisent des techniques réseau aux principes similaires (comme l'agilité de fréquence -frequency agility- au lieu du saut de canal, ou les nœuds maillés « somnolents » au lieu de nœuds synchronisés temporellement), tout en présentant des niveaux de performance complètement différents. Ces détails vont déterminer comment le choix du protocole peut influencer considérablement les per-

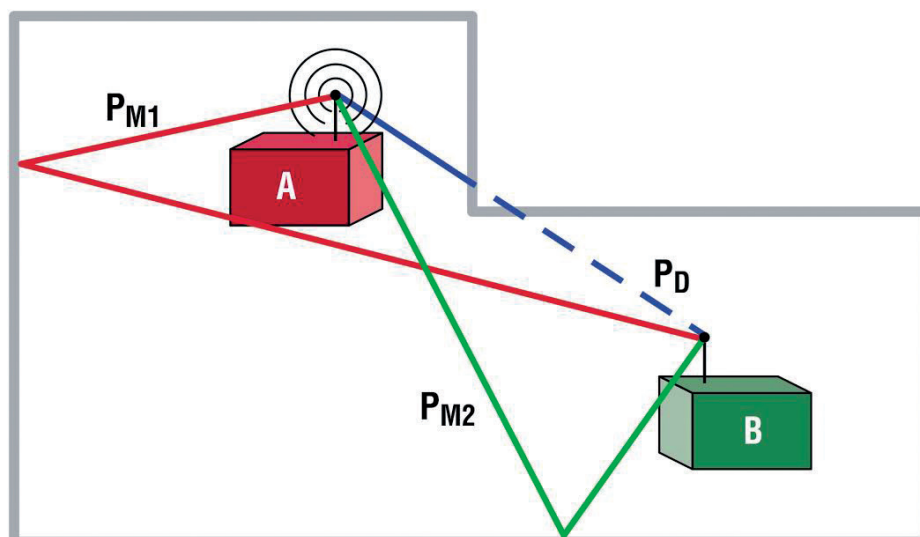
formances d'un WSN et la capacité d'un réseau à répondre aux besoins d'une application donnée.

Les défis des réseaux de capteurs sans fil

Puisque le sans-fil est par nature peu fiable, il est essentiel de comprendre ce qui limite sa fiabilité afin d'en tenir compte dans un système de communication. Contrairement aux communications filaires où le signal est protégé du monde extérieur par le câblage, les ondes RF se propagent dans l'air qui nous entoure et interagissent avec l'environnement extérieur. D'autres sources de transmissions RF peuvent aussi générer des interférences actives. Quoi qu'il en soit, le phénomène à prendre en compte est essentiellement l'effet de l'évanouissement multitrajet, là où le

1 EVANOUISSEMENT MULTITRAJET

L'amplitude d'un signal radio au niveau du récepteur (B) est fonction non seulement du chemin direct (P_D), mais aussi des réflexions (P_{M1} & P_{M2}) qui peuvent arriver au récepteur en déphasage et entraîner un fading important.

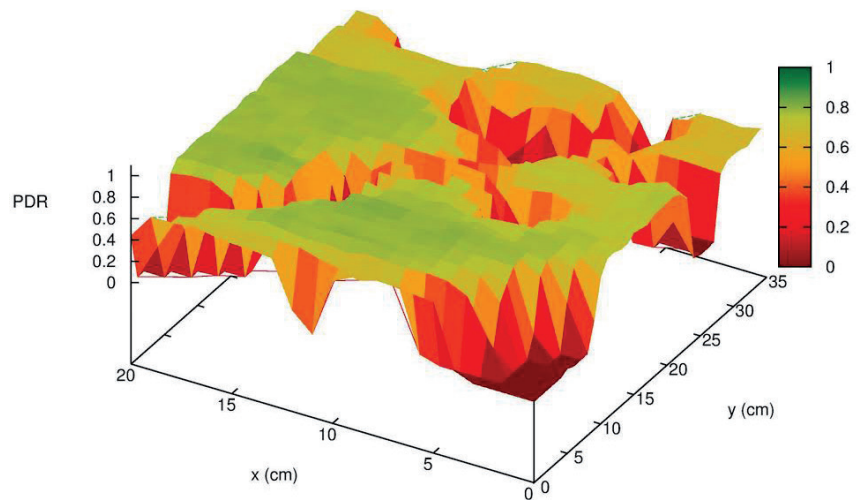


LES EFFETS DE L'ÉVANOUISSEMENT MULTITRAJET SUR LES COMMUNICATIONS SANS FIL

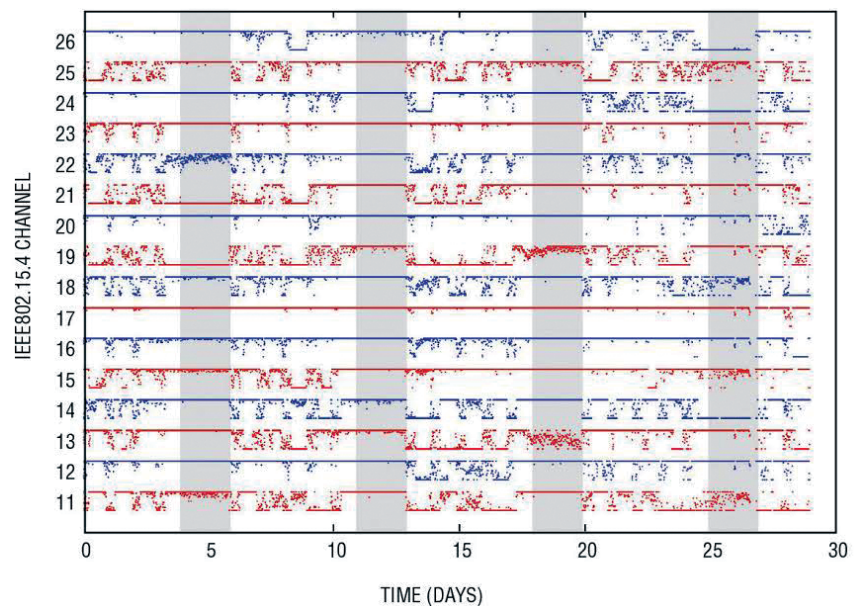
■ L'évanouissement multitrajet dépend de l'emplacement et de la nature de chaque objet se trouvant dans les alentours. Il est donc imprévisible dans toute installation fonctionnelle. Le fait que la topographie décrite dans la figure A1 change avec la fréquence constitue un bon point. En effet, si un paquet n'a pas été reçu à cause de l'évanouissement multitrajet, le retransmettre sur une autre fréquence a une forte probabilité de réussir. Parce que les objets présents dans les environs ne sont pas statiques (véhicules qui se déplacent, portes qui s'ouvrent et se ferment...), les effets de l'évanouissement multitrajet varient au cours du temps.

■ La figure A2 représente le taux de remise de paquets sur un seul trajet sans fil entre deux capteurs industriels et ce sur une période de 26 jours et pour chacun des 16 canaux utilisés par le système. Des cycles hebdomadaires correspondant aux jours ouvrables et aux week-ends sont clairement visibles. Certains canaux s'avèrent bons à tout moment (remises nombreuses), d'autres mauvais et d'autres encore sont de qualité très variable. Le canal 17 par exemple, bien que généralement bon, a au moins une période sur laquelle il a effectué zéro remise. Chaque trajet dans le réseau démontre un comportement qualitativement similaire bien qu'affublé de performances canal spécifiques, et il n'existe jamais un canal qui s'avérerait toujours praticable partout dans le réseau. En raison des interférences et de l'évanouissement multitrajet, la clé de la construction d'un système sans fil fiable est donc d'exploiter la diversité de canaux et de trajets.

A1 L'évanouissement multitrajet entraîne des variations importantes de la qualité de la liaison, même quand le récepteur se déplace de quelques centimètres seulement.



A2 Le taux de remise de paquets d'une liaison sans fil varie au cours du temps.



message RF peut être atténué par son propre signal, déphasé après réflexion sur les surfaces alentour (figure 1). Les utilisateurs de téléphones portables font l'expérience de ce phénomène tous les jours, quand l'intensité de la réception de leur téléphone, très faible à l'endroit où ils se tiennent, s'améliore quelques centimètres plus loin. Qui plus est, les effets de l'évanouissement multitrajet changent au cours du temps, au fur et à mesure que les surfaces qui renvoient le signal (par exemple les êtres humains, les voitures, les portes) bougent. Il en résulte, finalement, que chaque canal RF verra la qualité du signal qu'il

véhicule varier de façon importante dans le temps.

S'ajoute encore au problème le fait que l'évanouissement multitrajet est imprévisible. Par définition, un réseau doit transmettre de façon active sur un canal pour tester (et donc mesurer) les performances du canal en présence d'évanouissement multitrajet. De fait, alors qu'une simple mesure passive de l'amplitude d'un signal (RSSI) sur un canal inutilisé peut aider à détecter les sources actives d'interférences, elle ne permet pas de prédire si ce même canal convient ou non pour faire face à l'évanouissement multitrajet. Heu-

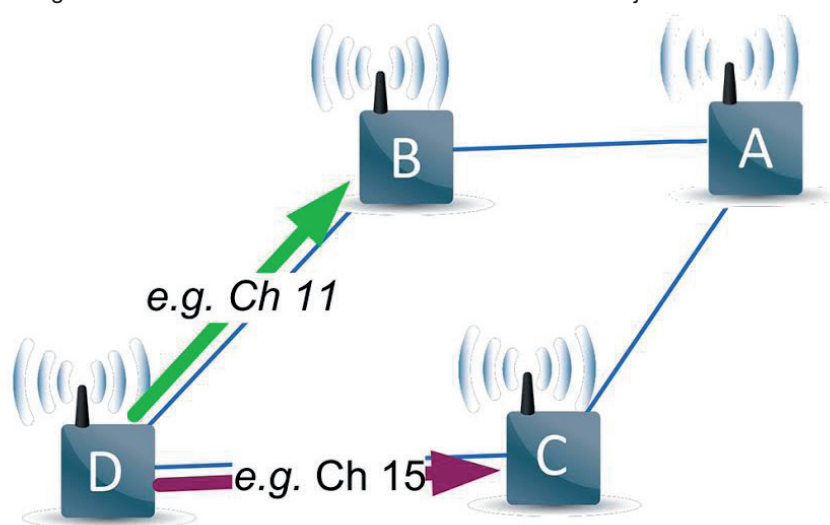
reusement, comme les effets négatifs de ce fading affectent différemment chaque canal RF et varient au cours du temps, ils peuvent être minimisés par des sauts de canal permettant la diversité de fréquence. Dès lors, pour les protocoles WSN, la difficulté réside dans le fait qu'ils doivent permettre les sauts de canal dans des réseaux de grande taille et dans des environnements multi-sauts.

Approches fréquentes observées dans les WSN

Pour comprendre comment les différents types de WSN se comportent face à ces contraintes, examinons les

2 DIVERSITÉS DE TRAJET ET DE FRÉQUENCE

Si la communication échoue le long de la flèche « verte », le nœud D essaie une nouvelle fois le long de la flèche « violette » sur un autre canal et un autre trajet.



techniques les plus courantes utilisées dans certains réseaux maillés sans fil pour traiter le problème de la diversité de fréquence et garantir une faible consommation.

- **Les WSN à canal unique avec agilité de canal:** cette approche courante dans les implantations simples de réseaux maillés sans fil consiste à faire fonctionner tous les nœuds sur un seul et même canal. Puisqu'un seul canal RF est utilisé, par définition, un seul dispositif peut émettre à la fois. Les développeurs de piles réseau choisissent encore souvent un fonctionnement monocanal en raison de la simplicité relative de sa mise en œuvre et fournissent de ce fait un WSN pratiquement sans diversité de fréquence. De façon à pouvoir réagir face à la présence d'interférences RF actives dans le canal, certains WSN monocanaux sont toutefois équipés d'un mécanisme appelé agilité de canal, qui permet à un réseau de diffuser un message à tous les nœuds leur intimant l'ordre de changer de canal. Mais, même dans les réseaux à canaux agiles, à tout moment, le réseau fonctionne toujours sur un seul et même canal. En fait, la mise en œuvre de l'agilité de canal fait l'hypothèse qu'il existe un canal unique qui convient à la totalité du réseau. Cependant, avec les effets de l'évanouissement multitrajet, tout canal RF est amené dans la pratique à subir une dégradation sévère du trajet au cours de la vie du réseau, entraînant l'abandon de nœuds sur

des périodes de temps de plusieurs minutes voire de plusieurs heures (voir l'encadré intitulé « *Les effets de l'évanouissement multitrajet sur les communications sans fil* »). Alors qu'un réseau avec agilité de canal peut changer de canal pour s'affranchir d'une source active d'interférences, il reste toujours susceptible de subir les effets dévastateurs de ce type de fading.

- **Les WSN à rapport cyclique avec mise en veille du réseau complet:** pour un fonctionnement à basse consommation, les réseaux de capteurs sans fil exécutent une certaine forme de rapport cyclique afin de minimiser le pourcentage de temps passé en mode actif (pour notamment émettre et recevoir, actions qui consomment typiquement plusieurs milliampères) et maximiser le pourcentage de temps passé en mode veille à basse consommation (typiquement 1 mA au maximum). Certains réseaux de capteurs sans fil incorporent donc une méthode de mise en veille du réseau complet, parfois appelé maillage « somnolent » (sleepy). Tous les nœuds du réseau sont alors mis dans un état de veille sur une période de temps assez longue et se réveillent à peu près en même temps pour envoyer/recevoir/router le trafic réseau. Dans de telles méthodes de mise en veille, le réseau est complètement indisponible pour les communications pendant la période d'inactivité. Par exemple, si un WSN ne se réveille qu'une fois toutes les heures pour effectuer les

communications, le réseau est incapable d'envoyer un message d'alarme pendant cette heure, et ne peut recevoir un message de la part d'un contrôleur pour allumer un indicateur d'alerte. Il importe aussi de prendre en considération le fait que la mise en veille du réseau complet affecte la capacité du WSN à faire face aux conditions de fonctionnement du monde réel. Pendant les périodes de veille prolongées, l'environnement RF alentour est toujours dynamique et changeant. Or tout chemin de signal qui devient inutilisable pendant la veille réseau ne peut être réparé que lorsque le réseau se réveille. Encore plus problématique est le fait que les réseaux en veille s'avèrent en général être des réseaux monocanaux, ce qui impose une contrainte supplémentaire au réseau pendant la période d'activité et ajoute un risque d'instabilité des communications.

Une autre répercussion de la mise en veille du réseau complet est qu'une telle approche force un utilisateur à adopter un débit de données plus faible (et donc moins de données) que ne le nécessite l'application. C'est un compromis malheureux, puisque le but principal d'un WSN est de transmettre des données de manière fiable, et d'utiliser ces informations pour que l'utilisateur parvienne à une connaissance plus approfondie de ses systèmes, en obtenant les tendances et les inefficacités opérationnelles, telles que la dégradation des performances de moteurs vieillissants ou l'augmentation de la consommation cyclique d'équipements de réfrigération anciens dans un magasin. Quand les données fournies par le WSN sont peu nombreuses en raison des limitations du réseau, l'utilité d'un tel réseau et des connaissances qui en sont tirées est alors limitée et risque de restreindre la proposition de valeur globale du système de surveillance et de contrôle.

- **Les réseaux maillés à saut de canal et synchronisation temporelle:** les réseaux maillés TSCH utilisent une synchronisation temporelle serrée au sein d'un réseau multi-saut pour une coordination étroite des communications et de l'utilisation des canaux de fréquence. Dans un réseau TSCH, tous les nœuds partagent une perception commune du temps, exacte

à quelques dizaines de microsecondes près dans tout le réseau. Les nœuds échangent des informations de décalage de synchronisation avec les nœuds voisins pour maintenir la synchronisation temporelle. Les communications sont par ailleurs organisées en créneaux temporels, pendant lesquels sont planifiées les occasions d'émettre ou de recevoir un paquet. En d'autres termes, chaque créneau temporel est assez long (par exemple 7,5 ms) pour qu'un nœud émetteur se réveille, émette un paquet et reçoive l'accusé de réception de la couche de liaison provenant du nœud récepteur. Le trafic dans un réseau TSCH peut être programmé de manière dynamique, ce qui permet le saut de canal en coordination, une complète diversité de trajet et de fréquence, un échange de paquets à basse consommation, et un rapport cyclique à disponibilité élevée.

● **Saut de canal en coordination pair-à-pair**: la synchronisation temporelle permet le saut de canal sur chaque paire d'émetteurs-récepteurs afin d'assurer la diversité de fréquence. Dans un réseau TSCH, chaque échange de paquet effectue des sauts de canal pour échapper aux inévitables interférences RF et évanouissements. De plus, des transmissions multiples entre des paires de dispositifs différents peuvent se produire simultanément sur différents canaux, ce qui accroît la bande passante du réseau. Il existe, par exemple, quinze canaux utilisables disponibles dans la spécification radio IEEE 802.15.4 à 2,4 GHz, qui se présente comme un choix courant pour les implantations de WSN en raison de la disponibilité globale de cette bande ISM. Cela représente pour un réseau TSCH jusqu'à quinze fois la bande passante disponible, par rapport à celle d'un WSN à canal 802.15.4 unique.

● **Diversité totale de trajet et de fréquence**: Chaque dispositif a accès à des chemins redondants pour pallier les interruptions de communication dues aux interférences, aux obstacles physiques ou à l'évanouissement multitrajet. Si la transmission d'un paquet échoue sur un trajet donné, un nœud ou « mote » va automatiquement réessayer sur le trajet disponible suivant et sur un canal RF différent (figure 2). En exerçant la diversité de trajet et la diversité de

fréquence à chaque nouvel essai (diversité temporelle), la probabilité de succès à chaque nouvel essai est plus élevée par rapport à celle d'un système à un seul canal.

● **Echange de paquets à basse consommation**: L'utilisation du TSCH permet aux nœuds d'être mis dans un état de veille à ultrabasse consommation entre deux communications planifiées. Chaque dispositif est actif uniquement s'il est en train d'envoyer un paquet ou s'il est en mode réception d'un paquet provenant d'un dispositif voisin. Mais surtout, puisque chaque nœud sait quand son réveil a été planifié, il est toujours disponible pour pouvoir relayer l'information provenant de ses voisins. Ainsi, les réseaux TSCH atteignent souvent des rapports cycliques inférieurs à 1% tout en maintenant le réseau complètement disponible. De plus, puisque chaque transaction de paquet est planifiée, il n'y a pas de collisions entre paquets intra-réseau dans un réseau TSCH. Les réseaux peuvent être denses et échelonnables sans être entravés par la production d'auto-interférences RF.

● **Rapport cyclique à haute disponibilité**: Contrairement à un réseau à rapport cyclique à l'échelle du réseau, dans un TSCH les nœuds individuels réveillent leurs émetteurs uniquement quand ils doivent émettre un paquet ou guetter la réception d'un paquet. En programmant le trafic réseau au niveau granulaire des échanges entre chaque émetteur-récepteur, un réseau TSCH peut facilement gérer un trafic de données hétérogène à l'échelle du réseau tout entier. Si vous avez, par exemple, un capteur de niveau de réservoir qui n'a besoin de trans-

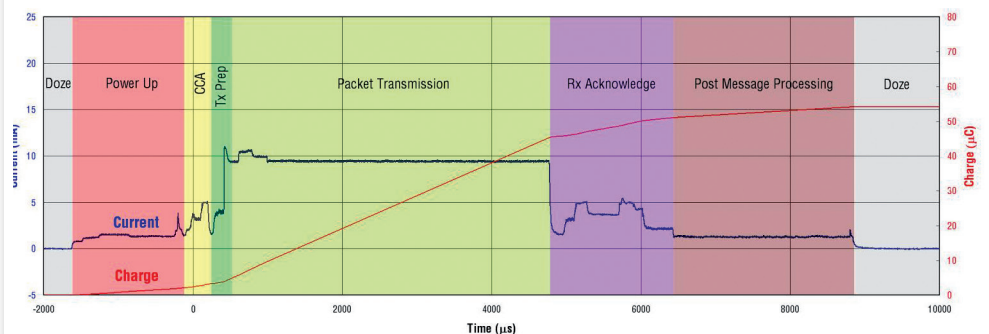
mettre qu'une fois toutes les heures, et plus loin, des capteurs de pression/débit qui rapportent toutes les secondes, alors un réseau TSCH va réveiller des nœuds (et leurs parents) uniquement à la fréquence qu'exige la transmission de manière fiable du type de trafic qui les concernent...

Associer un TSCH avec un matériel basse consommation

Les courants de fonctionnement des émetteurs-récepteurs 802.15.4 nécessaires aux fonctions de base, comme l'émission, la réception et la veille, ont diminué régulièrement au cours de la dernière décennie. Le LTC5800-IPM de Linear Technology, par exemple, consomme 9,5 mA pour une puissance émise de +8 dBm et 4,5 mA pour la réception, ce qui est 3 à 5 fois plus faible que le courant consommé par les émetteurs-récepteurs 802.15.4 de la génération précédente. Néanmoins si la réduction de la consommation crête est un bon début, il faut aussi considérer que l'énergie requise pour envoyer un paquet est fonction de la quantité de charge électrique consommée sur une période de temps. Si le courant consommé est mesuré sur un oscilloscope et représenté en fonction du temps (voir figure 3), alors l'énergie requise pour envoyer un paquet est représentée par l'aire de la zone située sous la courbe et dépend non seulement des courants de crête, mais aussi de la durée de chaque action. Les produits tels que le LTC5800-IPM effectuent des échanges de paquets optimisés avec précision, avec une émission et un accusé de réception de paquets réussis pour une charge électrique

3 AVANTAGES D'UNE ARCHITECTURE MATÉRIELLE OPTIMISÉE POUR LE TSCH

La figure montre la consommation en courant pendant l'émission d'un paquet et la réception de l'accusé de réception de la couche de liaison. Avec du matériel optimisé pour le TSCH, comme le LTC5800-IPM de Linear Technology, les transactions individuelles ne consomment potentiellement qu'une charge électrique de 54,5 µC.



minuscule de 54,5 µC à une tension d'alimentation de 3,6V (soit une énergie de 196,2 µJ).

Une approche système pour la basse consommation

En considérant de manière plus holistique la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs sans fil, nous pouvons constater qu'atteindre une basse consommation dépend du trafic de données, de l'énergie requise pour envoyer un paquet et du nombre de nouveaux essais nécessaires à l'envoi réussi d'un paquet d'un nœud à l'autre :

$$Average\ Energy = f\left(\left(\frac{Num\ Packets}{Period\ of\ Time}\right) \times \left(\frac{Energy}{per\ Packet}\right) \times \left(\frac{Num\ Retries\ to\ Successfully\ Send\ A\ Packet}{Send\ A\ Packet}\right)\right)$$

En se concentrant sur l'énergie par paquet et en utilisant un protocole réseau qui pratique diversité temporelle, diversité de trajet et diversité de fréquence à chaque nouvel essai (ce qui réduit d'autant le nombre de nouveaux essais nécessaires en moyenne pour envoyer un paquet), une basse consommation peut être atteinte en améliorant l'efficacité dans tout le système plutôt qu'en faisant des sacrifices au niveau de la couche application. Les communi-

cations dans un réseau TSCH sont hautement programmables et configurables, avec une attribution automatique des créneaux temporels aux communications en fonction des besoins de l'application. Un réseau TSCH peut être configuré pour des débits de données faibles pour minimiser la puissance requise, et potentiellement permettre l'utilisation de technologies de récupération d'énergie ambiante. Ce même réseau TSCH peut être configuré pour accepter des fréquences de communication hétérogènes, comme celles couramment rencontrées dans les usines, où des variables changeant lentement (par exemple, un niveau de réservoir) et des variables changeant rapidement (l'écoulement dans un tuyau) se côtoient. Un réseau TSCH va automatiquement attribuer les créneaux temporels requis aux portions du réseau qui en ont besoin. Au lieu de forcer les utilisateurs à adapter leurs applications pour répondre aux besoins du réseau, un réseau TSCH peut s'adapter pour répondre aux besoins d'un large éventail d'applications.

Le TSCH, déjà considéré comme un élément de base des normes indus-

trielles sans fil existantes à l'instar du WirelessHART (CEI 62591), apporte déjà sa contribution aux normes émergentes pour réseaux de capteurs sans fil basés sur le protocole IP, y compris le standard IEEE 802.15.4e. Des travaux sont également en cours pour standardiser la couche de liaison TSCH au sein du groupe IETF 6TiSCH. L'adoption du TSCH dans des normes pertinentes va donc continuer à encourager son adoption à grande échelle.

Pour une mise en œuvre de l'Internet des objets industriel

Par ailleurs, les réseaux TSCH ont déjà démontré qu'il était possible d'atteindre une autonomie de plusieurs années et une fiabilité de données supérieure à 99,999% dans diverses applications exigeantes comme la surveillance de procédés industriels, la sécurité périmétrique, l'efficacité énergétique des centres de données et les solutions de parking intelligent à l'échelle d'une ville. Sans fil, à basse consommation, très fiables et hautement configurables, les réseaux TSCH sont donc parfaitement adaptés à l'Internet des objets industriel.



La force d'un média numérique intégré

Site Internet + Newsletter + eMagazine

ACCÈS ILLIMITÉ

1 an
120 € HT*

6 mois
60 € HT*

*TVA applicable : 20%

Abonnez-vous ici !