

Olivier Hersent
David Boswarthick
Omar Elloumi



L'INTERNET DES OBJETS

Les principaux protocoles M2M
et leur évolution vers IP
avec BACnet, LonWorks, ModBus, KNX,
Z-Wave, 6LoWPAN, ZigBee SE 2.0, ETSI M2M...

Traduit de l'anglais par **Hervé Soulard**

DUNOD

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée par John Wiley & Sons sous le titre :

The Internet of Things ; Keys Applications and Protocols, 2nd edition

ISBN : 978-1-119-99435-0

© 2012 John Wiley & Sons Ltd

La version française est une traduction autorisée. Elle a été adaptée et mise à jour par les auteurs.

Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Dunod Editeur and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

Toutes les marques citées dans cet ouvrage sont des marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

Le logo ETSI a été reproduit avec l'aimable autorisation de l'ETSI.

Illustration de couverture : © 3 darcastudio
Montage de l'illustration de couverture : © Clément Pinçon

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2014

5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-071181-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	1
Tutoriels en ligne	5

A

Les couches physiques pour réseaux M2M

Chapitre 1 : IEEE 802.15.4	9
1.1 La famille de normes du comité IEEE 802	9
1.2 La couche physique	10
1.3 La couche de contrôle d'accès au support	15
1.4 Utilisations du 802.15.4	25
1.5 Le futur de la norme 802.15.4 : 802.15.4e et 802.15.4g	26
Chapitre 2 : Courants porteurs en ligne pour applications M2M	33
2.1 Vue d'ensemble des technologies CPL	33
2.2 Panorama des CPL	33
2.3 Limitations du support CPL	40
2.4 Système CPL idéal pour le M2M	47
Chapitre 3 : Protocoles émergents de radio longue portée pour applications M2M	53
3.1 La radio longue portée faible puissance : le Graal du M2M	53
3.2 Le défi des communications radio à longue portée sur les bandes libres	56
3.3 Les technologies de communication très bas débit	59

B

Les protocoles M2M généralistes pour le bâtiment et le contrôle commande

Chapitre 4 : Protocole BACnet™	67
4.1 Normalisation	67
4.2 Technologie	68
4.3 Sécurité de BACnet	78
4.4 Services BACnet au-dessus du Web (Annexe N, Annexe H6)	78
Chapitre 5 : Plateforme LonWorks®	85
5.1 Normalisation	85
5.2 Technologie	86
5.3 SmartServer d'Echelon	98
5.4 Interface REST	99
Chapitre 6 : ModBus	105
6.1 Introduction	105
6.2 Normalisation	106
6.3 Trame et modes de transmission d'un message	106
6.4 ModBus/TCP	107
Chapitre 7 : KNX	109
7.1 Association Konnex/KNX	109
7.2 Normalisation	109
7.3 Vue d'ensemble	110
7.4 Configuration d'un dispositif	122
Chapitre 8 : ZigBee	123
8.1 Développement de la norme	123
8.2 Architecture de la pile ZigBee	124

8.3 Association	128
8.4 Couche réseau	131
8.5 Couche APS	139
8.6 Objet et profil de dispositif ZigBee	143
8.7 Sécurité dans ZigBee	146
8.8 Bibliothèque de clusters ZigBee	151
8.9 Profils d'applications ZigBee	155
8.10 Spécifications de la passerelle ZigBee pour les dispositifs réseau	167
Chapitre 9 : Z-Wave	177
9.1 Historique et prise en charge du protocole	177
9.2 Le protocole Z-Wave	178

C

Les protocoles M2M pour le comptage et la métrologie

Chapitre 10 : M-Bus filaire et sans fil (WM-Bus)	195
10.1 Développement de la norme	195
10.2 Architecture	196
10.3 M-Bus sans fil (WM-Bus)	201
Chapitre 11 : La suite protocolaire ANSI C12	205
11.1 Introduction	205
11.2 C12.19 : le modèle de données	206
11.3 C12.18 : communication point à point de base via un port optique	209
11.4 C12.21 : extension de C12.18 pour des communications par modem	210
11.5 C12.22 : transport des tables C12.19 via tout système de communication réseau	212
11.6 Autres parties de la suite de protocoles ANSI C12	217

11.7 RFC 6142 : Transport C12.22 au-dessus d'un réseau IP	218
11.8 Interfaces REST pour C12.19	219
Chapitre 12 : DLMS/COSEM	221
12.1 Normalisation de DLMS	221
12.1 Modèle de données COSEM	223
12.2 Système d'identification d'objet (OBIS)	225
12.3 Classes d'interface DLMS/COSEM	227
12.4 Accès aux objets d'interface COSEM	230
12.5 Sécurité point à point dans l'approche DLMS/COSEM	235
 D 	
La nouvelle génération : protocoles fondés sur IP	
Chapitre 13 : 6LoWPAN	239
13.1 Vue d'ensemble	239
13.2 Normalisation de 6LoWPAN et de RPL	240
13.3 Couche d'adaptation 6LoWPAN	242
13.4 Sécurité des réseaux IP contraints	256
Chapitre 14 : Formation des réseaux 6LoWPAN : RPL et MLE	263
14.1 MLE	263
14.2 RPL	265
Chapitre 15 : ZigBee Smart Energy 2.0	277
15.1 Introduction à REST	277
15.2 Vue d'ensemble de ZigBee SEP 2.0	281
15.3 Jeux de fonctions et types de dispositifs	288
15.4 Conclusion	300

Chapitre 16 : Architecture ETSI M2M/OneM2M	303
16.1 Introduction	303
16.2 Architecture système	305
16.3 Structure des ressources de la fonction SCL	309
16.4 Vue d'ensemble des interactions ETSI M2M	327
16.5 Sécurité dans le framework ETSI M2M	329
Chapitre 17 : ETSI M2M : interopérabilité avec les réseaux de machines	335
17.1 Mappage des réseaux M2M et des ressources ETSI M2M	336
17.2 Aspects sémantiques	336
17.3 TR 102 966, principes d'interopérabilité dans les réseaux de machines	338
17.4 TR 102 966, ressources REST	341
17.5 TR 102 966 : interactions indépendantes du protocole et accès aux fonctionnalités natives du protocole	343
17.6 Interopérabilité avec ZigBee 1.x	345
17.7 Interopérabilité avec KNX	347
17.8 Interopérabilité avec wMBUS	350
17.9 Interopérabilité avec d'autres protocoles de comptage	353
Liste d'acronymes	357
Index	367

Avant-propos

L'innovation survient rarement là où on l'attend. De nombreux pays ont dépensé des sommes considérables pour améliorer la bande passante proposée aux internautes et aller vers le très haut débit, mais ont fini par découvrir qu'une personne ne regarde qu'un nombre limité de films en très haute définition à la fois. Sans oublier que le nombre d'êtres humains sur Terre est lui aussi limité.

Les prochaines années nous réservent d'autres surprises en raison de l'émergence de l'Internet des objets (IdO). Votre téléphone mobile et votre ordinateur sont déjà connectés à Internet, peut-être même le GPS de votre véhicule. Dans les années à venir, votre voiture, votre bureau, votre domicile et tous les appareils électroménagers qu'ils contiennent, y compris les compteurs d'électricité, de gaz et d'eau, l'éclairage public, le système d'arrosage automatique, les pèse-personne, les tensiomètres et même les murs seront connectés à l'IdO. Demain, les appareils électroménagers profiteront de nombreuses améliorations. Par exemple, le chauffage ne sera pas déclenché si la météo prévoit des températures clémentes mais sera déclenché plus tôt que prévu si le vent permet d'accéder à de l'énergie propre à ce moment, le jardin ne sera arrosé automatiquement que s'il ne pleut pas, une assistance routière sera apportée immédiatement en cas de besoin, etc. Ces améliorations faciliteront nos vies et permettront une utilisation plus efficace des ressources naturelles.

Pourquoi cette agitation se produit-elle maintenant ? Comme souvent, elle provient d'une combinaison de petites innovations qui, réunies, ont permis d'atteindre le seuil critique de déclenchement :

- ▶ Les technologies de **bus de terrain**, en utilisant des protocoles et normes parfois propriétaires (LON, KNX, DALI, CAN, ModBus, M-Bus, ZigBee, Z-Wave), ont exploré de nombreux domaines verticaux. Ceux-ci ont progressivement commencé à se chevaucher lorsque les cas d'utilisation se sont complexifiés, et des protocoles ont émergé pour faciliter l'interopérabilité (par exemple BACnet et oBix). Mais les déploiements de bus de terrain actuels continuent à exploiter des réseaux parallèles qui ne collaborent pas. La nécessité d'une technologie réseau commune qui pourrait travailler au-dessus de n'importe quelle couche physique, comme IP, est à présent une évidence.
- ▶ Malgré le besoin d'une technologie de mise en réseau indépendante des technologies de communication des bus de terrain, IP n'a pas été envisagé pour les

couches physiques à faible débit car la taille importante de ses en-têtes le rend inefficace dans les réseaux de bus de terrain généralement employés. Mais cela est bien fini : avec 6LoWPAN, non seulement la **technologie IP** a trouvé sa voie dans les réseaux à faible débit, mais, surprise, il s'agit de la version IPv6. Par ailleurs, sa mise en œuvre se fait avec un protocole de routage standard permettant de former un réseau IP maillé unique au-dessus de multiples couches physiques. Des technologies de bus de terrain de couche 2 différentes peuvent enfin collaborer et former des réseaux plus vastes.

- Les réseaux de bus de terrain locaux mettent aujourd'hui en place des **algorithmes** sophistiqués pour optimiser les systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation) dans les bureaux et les habitations. Les exigences d'efficacité énergétique des nouveaux bâtiments ont créé un besoin d'algorithmes encore plus complexes, comme la régulation prédictive qui tient compte des prévisions météo ou le déplacement de charge qui optimise la part CO₂ de l'électricité. Dans de nombreux secteurs d'automatisation, les outils de pointe exigent que le bus de terrain local collabore avec des applications centralisées hébergées et des sources de données. La technologie qui permet cela a progressé par étapes : oBix a introduit le concept d'interface uniforme (REST) dans les réseaux de capteurs, ETSI M2M a ajouté la gestion de la sécurité, ainsi que des améliorations nécessaires pour les réseaux publics à grande échelle.
- Enfin, des **technologies radio** pervasives à faible débit, adaptées aux objets autonomes fonctionnant sur batterie et à très faible coût, sont apparues, permettant d'envisager un accès Internet partout, pour tout objet, dans les années qui viennent.

L'industrie manquait seulement d'un marché véritablement attrayant pour lancer les énormes efforts de recherche et de développement nécessaires à l'intégration de toutes ces technologies et à la mise en place d'un Internet des objets à toute épreuve.

Ce marché est venu du secteur de l'énergie :

- L'augmentation de la part des sources d'énergie renouvelables dans la production globale de l'électricité a augmenté le caractère aléatoire d'un système d'approvisionnement traditionnellement déterministe.
- En parallèle, l'introduction en masse des véhicules électriques et hybrides rechargeables rend la demande encore plus complexe. Ces véhicules sont des objets itinérants qui doivent être authentifiés auprès du réseau et qui nécessitent des protocoles de gestion de charge.

La règle actuelle des fournisseurs d'électricité, « la demande est imprévisible et notre expertise est d'adapter la production à la demande », est en passe de s'inverser, pour

devenir « la production est imprévisible et notre expertise est d'adapter la demande à la production ».

Avec un tel changement des règles du jeu, les atouts essentiels d'un fournisseur d'énergie seront non plus ses moyens de production mais son réseau de communication et son système d'information de nouvelle génération. Mais il lui reste encore à les construire intégralement, ce qui ouvre un énorme marché pour des technologies M2M robustes, adaptées à l'importance de l'enjeu et aux échelles considérées. La modification spectaculaire de la distribution de l'électricité préfigure une évolution plus générale de l'Internet vers l'Internet des objets, dans laquelle les applications réseau auront un impact plus important sur notre vie quotidienne, y compris sur les objets que nous manipulons et utilisons, dont un grand nombre deviendra connecté.

Cet ouvrage cible un public d'ingénieurs qui sont impliqués ou souhaitent s'impliquer dans une automatisation à grande échelle sur de nombreux sites, par exemple des projets de type *smart grid*, et qui doivent acquérir une vision globale de l'état de l'art des communications M2M.

Un grand nombre de ces projets impliqueront des interfaces avec des systèmes existants. Nous proposons une vue d'ensemble de nombreux bus de terrain et technologies d'automatisation largement déployés : BACnet, CAN, LON, M-Bus/wMBUS, ModBus, LON, KNX, ZigBee, Z-Wave, ainsi que les normes de comptage C.12 et DLMS/COSEM. Nous entrons également en détail dans deux couches physiques répandues, 802.15.4 et CPL, et nous présentons les technologies émergentes de communication à longue portée par radio à faible puissance d'émission : la technologie ultra-narrowband et la technologie à étalement de spectre LoRa™.

Cet ouvrage ne fera pas de vous un expert de toutes ces technologies mais vous permettra d'acquérir suffisamment d'informations pour comprendre précisément le fonctionnement, le domaine d'application et les possibilités de chacune. Les descriptions accélérées devraient vous permettre ensuite de découvrir plus facilement les détails par vous-même en naviguant dans les spécifications.

Le futur des protocoles de bus de terrain se trouve dans leur convergence au-dessus du protocole fédérateur de l'Internet IP. Nous décrivons 6LoWPAN et RPL, ainsi que le premier protocole d'automatisation conçu explicitement pour les réseaux 6LoWPAN : ZigBee SE 2.0. Nous faisons également une introduction à la norme ETSI M2M émergente. Elle représente l'élément manquant tant attendu par les fournisseurs de services qui souhaitent offrir une infrastructure M2M publique générale, partagée par toutes les applications.

Je voudrais remercier ici les nombreuses personnes qui ont aidé à documenter ou à rédiger cet ouvrage : Gilles Lefevre, inlassable relecteur et surtout rédacteur de spécifications, auquel je dois notamment le détail de toutes les spécifications

d'interfaces REST avec les bus terrain, Paul Bertrand, inventeur de la technologie de bus de terrain CPL WPC et concepteur du premier portage de 6LoWPAN sur CPL, pour avoir accepté d'écrire, vous l'aurez deviné, le chapitre sur les courants porteurs en ligne. Jean-Marc Ballot (Alcatel) pour les chapitres sur C.12 et DLMS, qui ont nécessité un important travail de documentation. Noe-Jean Caramelli, pour ses recherches sur les protocoles de sécurité adaptés au très bas débit. Philippe Magneron pour son support au sein de l'association KNX et avoir contribué à faire émerger l'interface REST présentée ici. Nicolas Sornin, Olivier Seller et François Sforza (Cicleo/Semtech) pour leur travail extraordinaire sur le bas débit radio, et notre travail commun sur l'optimisation d'une couche MAC pour ces réseaux. Nicolas Jordan pour son aide à décliner le concept de boutique d'application pour l'Internet des Objets, Jean-Baptiste Reich pour sa relecture des chapitres ETSI M2M et des tutoriaux vidéo... et toute l'équipe de mes collègues et complices de Netcentrex et aujourd'hui Actility, qui contribuent à accoucher à travers toutes les frustrations du monde réel nos rêves communs.

Malgré tous mes efforts, il est possible que cet ouvrage contienne encore quelques erreurs, mais elles auraient été beaucoup plus nombreuses sans l'aide des relecteurs experts : Cedric Chauvenet et Mathieu Pouillot pour 6LoWPAN/RPL et ZigBee, Bob Dolin, Jeff Lund, Larry Colton et Mark Ossel chez Echelon pour LON, Benoit Guennec et Baptiste Vial (Connected Object) pour Zwave notamment.

N'hésitez pas à m'indiquer les éventuelles erreurs résiduelles que vous pourriez découvrir afin que je puisse améliorer la prochaine édition (olivier.hersent@actility.com).

La collecte et la lecture de la documentation nécessaire à la rédaction de cet ouvrage m'ont permis de découvrir de nouveaux horizons et d'ouvrir de nouvelles perspectives. J'espère que vous apprécierez le lire autant que j'ai apprécié l'écrire.

Olivier Hersent

Tutoriels en ligne

En complément de cet ouvrage vous trouverez ci-dessous 10 tutoriels, **en anglais**, accessibles librement en ligne à l'aide de leur QR code. Que vous soyez développeur, ingénieur ou décideur ils vous aideront à découvrir l'univers M2M.

Video 1: What is ETSI M2M ?



In this video we will give you an introduction to ETSI M2M and why do people need it. It is targeted to audience who want a system level architecture. Most of these topics are further illustrated in details in the upcoming videos.

Video 2: Introducing Gateway-to-Cloud interface : mld



In this video we will install a new ETSI M2M gateway (the GSC function defined in ETSI TS 102 690 and TS 102 921), and then register it to an NSC in the cloud..

Video 3: Installing a new ETSI M2M gateway using open-source Cocoon & First interactions with ONG browser



This video covers the technical aspect of ETSI M2M on Cocoon, an ETSI M2M based NSC Platform.

Video 4: Connecting to the M2M Cloud



Video 4 will present the various REST resources used by ETSI M2M.

Video 5: Analysing ETSI M2M REST Resources



This video will tell you more about the major ETSI M2M REST resources and help you get a better understanding of these resources using a web browser.

Video 6: Understanding Cloud mechanisms & NSC function



This video focuses on the «cloud» function of ETSI M2M : the NSC. The main functionalities of the NSC are discussed in details:

Video 7: Understanding REST drivers for fieldbus protocols : the ETSI TR102966 interworking resources



If you are looking for a generic REST API for your next automation application, don't miss this video ! Most TR102966 drivers are available as open-source on the Cocoon project web site.

Video 8: A ZigBee 1.x primer



This is a crash course that focuses on the needs of a ZigBee network administrator or ZigBee application developer

Video 9: Cocoon ZigBee driver

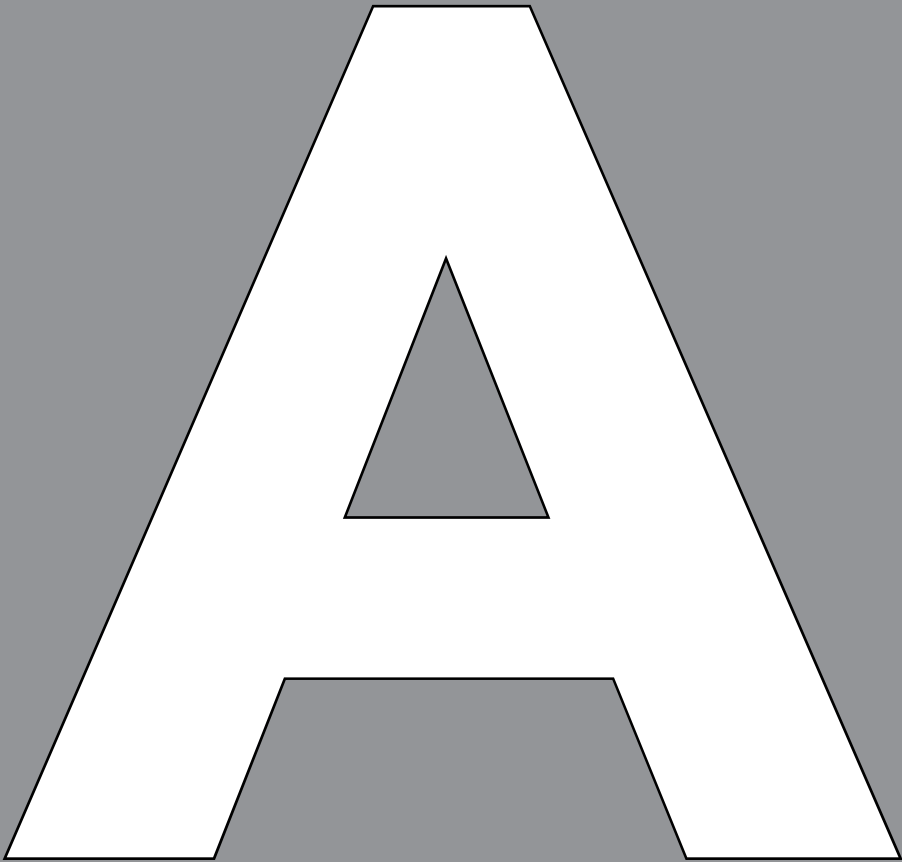


This video enables M2M applications to discover the topology of a fieldbus network, or read sensor measurements without bothering about the specific protocol employed.

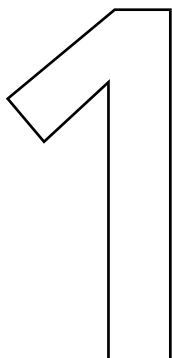
Video 10: Cocoon ZigBee driver configuration



This video is for the expert user.



**LES COUCHES
PHYSIQUES POUR
RÉSEAUX M2M**



1.1 La famille de normes du comité IEEE 802

Le comité 802 de l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) définit les technologies de la couche physique et de la couche liaison de l'OSI. Cette dernière est elle-même constituée de deux couches secondaires :

- ▶ La sous-couche de contrôle d'accès au support (MAC, *Media Access Control*) se place directement au-dessus de la couche physique (PHY) et met en œuvre les méthodes d'accès au réseau, comme la méthode d'accès multiple avec écoute de la porteuse et détection des collisions (CSMA/CD, *Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection*), employée par Ethernet, et la méthode d'accès multiple avec écoute de la porteuse et esquive des collisions (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*), employée par les protocoles sans fil de l'IEEE.
- ▶ La sous-couche de contrôle de la liaison logique (LLC, *Logical Link Control*), qui construit les trames de données envoyées sur le canal de communication au travers des couches MAC et PHY. L'IEEE 802.2 définit un format de trame indépendant des couches MAC et PHY sous-jacentes et présente aux couches supérieures une interface uniforme.

Depuis 1980, l'IEEE a défini de nombreuses normes MAC et PHY répandues (le tableau 1.1 illustre uniquement les normes sans fil), qui se fondent toutes sur la couche LLC du 802.2.

Le 802.15.4 a été défini par le groupe de travail 4/4b du comité IEEE 802.15 (<http://ieee802.org/15/pub/TG4b.html>). La norme a été initialement publiée en 2003 puis révisée en 2006 et 2011. Ces dernières versions améliorent les débits de données des couches physiques dans les bandes 868 et 900 MHz (jusqu'à 250 kbps, à la place des 20 et 40 kbps, respectivement). Vous pouvez les télécharger gratuitement à partir du site de l'IEEE à l'adresse <http://standards.ieee.org/getieee802/download/>.

Tableau 1.1 Les couches MAC définies par l'IEEE

Couche MAC	Utilisation	Bande
802.11	Wi-Fi	802.11, 802.11b, 802.11g, 802.11n : ISM 802.11a : U-NII
802.15.1	Bluetooth	ISM 2,4 GHz
802.15.4	ZigBee, 6LoWPAN	ISM 2,4 GHz dans le monde entier ISM 902–928 MHz aux USA 868,3 MHz dans les pays européens 802.15.4a : 3,1–10,6 GHz
802.16	Réseaux métropolitains sans fil (WMAN, <i>Wireless Metropolitan Access Network</i>) Technologie large bande mobile (BWA, <i>Broadband Wireless Access</i>), WiMax	802.16 : 10–66 GHz 802.16a : 2–11 GHz 802.16e : 2–11 GHz pour le fixe et 2–6 GHz pour le mobile

1.2 La couche physique

La conception de la norme 802.15.4 prend en compte les règles d'allocation des fréquences en vigueur aux États-Unis (FCC CFR 47), au Canada (GL 36), en Europe (ETSI EN 300 328-1, 328-2, 220-1) et au Japon (ARIB STD T66). Aux États-Unis, la gestion et l'allocation des bandes de fréquences sont sous la responsabilité de la Commission fédérale des communications (FCC, *Federal Communications Commission*). La FCC a alloué des fréquences pour les applications industrielles, scientifiques et médicales (ISM), qui peuvent être utilisées sans demande d'autorisation préalable lorsque la puissance d'émission est inférieure à 1 W. Par ailleurs, pour les applications à faible puissance, la FCC a réservé la bande U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*). Le tableau 1.2 recense les fréquences et la puissance d'émission maximale pour chaque bande.

Tableau 1.2 Les bandes ISM et U-NII de la FCC

Bande FCC	Puissance d'émission maximale	Fréquences
Industrielle	< 1 W	902 MHz–928 MHz
Scientifique	< 1 W	2,4 GHz–2,48 GHz
Médicale	< 1 W	5,725 GHz–5,85 GHz
U-NII	< 40 mW	5,15 GHz–5,25 GHz
	< 200 mW	5,25 GHz–5,35 GHz
	< 800 mW	5,725 GHz–5,82 GHz

L'IEEE 802.15.4 peut employer :

- ▶ la bande ISM 2,4 GHz (bande S) dans le monde entier, avec un débit de données de 250 kbps (modulation O-QPSK) et 15 canaux (de 11 à 26) ;
- ▶ la bande ISM 902–928 MHz (bande I) aux États-Unis, avec un débit de données de 40 kbps (modulation BPSK), 250 kbps (modulation BPSK+O-QPSK ou ASK) ou 250 kbps (modulation ASK) et 10 canaux (de 1 à 10) ;
- ▶ la bande de fréquences 868–868,6 MHz en Europe, avec un débit de données de 20 kbps (modulation BPSK), 100 kbps (modulation BPSK+O-QPSK) ou 250 kbps (PSSS : modulation BPSK+ASK) et un seul canal (0 pour la modulation BPSK ou O-QPSK, et 1 pour la modulation ASK).

Dans la pratique, la plupart des mises en œuvre actuelles utilisent la bande de fréquences 2,4 GHz disponible dans le monde entier. Cela évolue actuellement notamment en Europe car les bandes sub-GHz se comportent mieux en habitat dense et constructions de pierre et la norme 802.15.4g a défini de nouveaux canaux sub-GHz rendant les déploiements possibles. Plus récemment, une nouvelle couche physique a été conçue pour la bande ultralarge (3,1 à 10,6 GHz).

Modulation O-QPSK à 2,4 GHz

Les données à transmettre sont découpées en bloc de 4 bits. Chacun de ces blocs est associé à un *symbole* parmi les seize définis. Le symbole est ensuite converti en une séquence de *chips* de 32 bits (étalement de spectre par une séquence pseudo-aléatoire définie pour chaque symbole par le 802.15.4). Les bits pairs sont transmis par modulation de la composante en phase (I) tandis que ceux impairs le sont par modulation de la composante en quadrature (Q), comme illustré à la figure 1.1. Chaque chip est modulé sous forme d'une impulsion semi-sinusoidale. Le débit des chips émis est de 2 Mchip/s, ce qui correspond à un débit de symboles 32 fois plus lent et un débit de données utilisateur de 250 kbps. La somme des signaux I et Q est ensuite transposée sur la porteuse à 2,4 GHz.

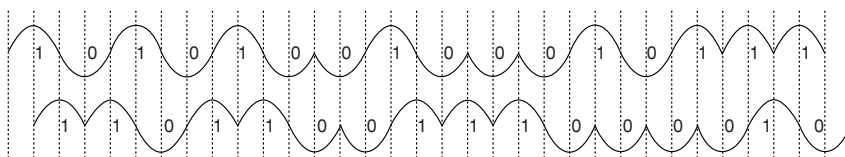


Figure 1.1 Les composantes I et Q de la modulation O-QPSK

Le 802.15.4 met en place un codage sur 32 bits pour faire référence à une bande de fréquences, une modulation et un canal précis. Les cinq premiers bits indiquent un numéro de page tandis que les 27 bits restants servent de numéro de canal dans la