

Technologies de communication sans fil

Table des matières

Introduction	2
Notions de base	2
Qu'est-ce qu'une onde radio?	2
Spectre radio et allocations de fréquences	3
Modulation des ondes	3
Bandes de fréquences et canaux	4
Wi-Fi	4
SSID	4
Standard Wi-Fi	4
Bandes de fréquences	5
Vitesse maximale	7
Sécurité et chiffrement	7
Bluetooth	8
Technologies à basse consommation	8
Bluetooth Low Energy (BLE)	9
Zigbee	9
Z-Wave	10
Thread	11
Synthèse	11
Références	13



Introduction

Qui, de nos jours, n'utilise pas des technologies de communication sans fil telles que Wi-Fi, Bluetooth et LTE? Celles-ci font désormais partie intégrante de nos réseaux informatiques, et elles ont rendu possible une mobilité dont on ne pouvait que rêver autrefois. Dans ces notes de cours, nous aborderons six technologies de communication sans fil couramment utilisées pour la communication entre composants informatiques, que ceux-ci soient des ordinateurs, des périphériques ou des objets connectés. Ces technologies sont **Wi-Fi**, **Bluetooth**, **BLE**, **Zigbee**, **Z-Wave** et **Thread**.

Notions de base

Qu'est-ce qu'une onde radio?

Une onde radio est un type d'onde électromagnétique, soit un phénomène physique qui inclut aussi la lumière. N'étant pas dans un cours de physique, nous ne nous attarderons pas davantage à la nature de ces ondes. Pour simplifier les choses, nous pouvons considérer les ondes radio comme une sorte de lumière invisible à l'œil humain.

Toute onde possède une **fréquence**. Pour illustrer le concept de fréquence, on peut penser à des vagues sur l'océan : si on se tenait sur une plage et qu'on comptait le nombre de vagues qui passent par un point précis dans une minute, on obtiendrait la fréquence de ces vagues en « vagues par minute ». Dans le cas des ondes électromagnétiques, qui sont beaucoup plus rapides, on calcule la fréquence par seconde plutôt que par minute, et on l'exprime donc en **Hertz (Hz)** – eh oui, comme la fréquence d'horloge d'un processeur!

Les propriétés physiques d'une onde électromagnétique varient selon la fréquence de celle-ci. On a donc divisé le **spectre électromagnétique** en types d'ondes qui correspondent à des plages de fréquences selon leurs propriétés. Ces types d'ondes comprennent, en ordre croissant de plages de fréquences :

- Ondes radio
- Micro-ondes
- Infrarouge
- Lumière visible
- Ultraviolet
- Rayons X
- Rayons gamma (γ)

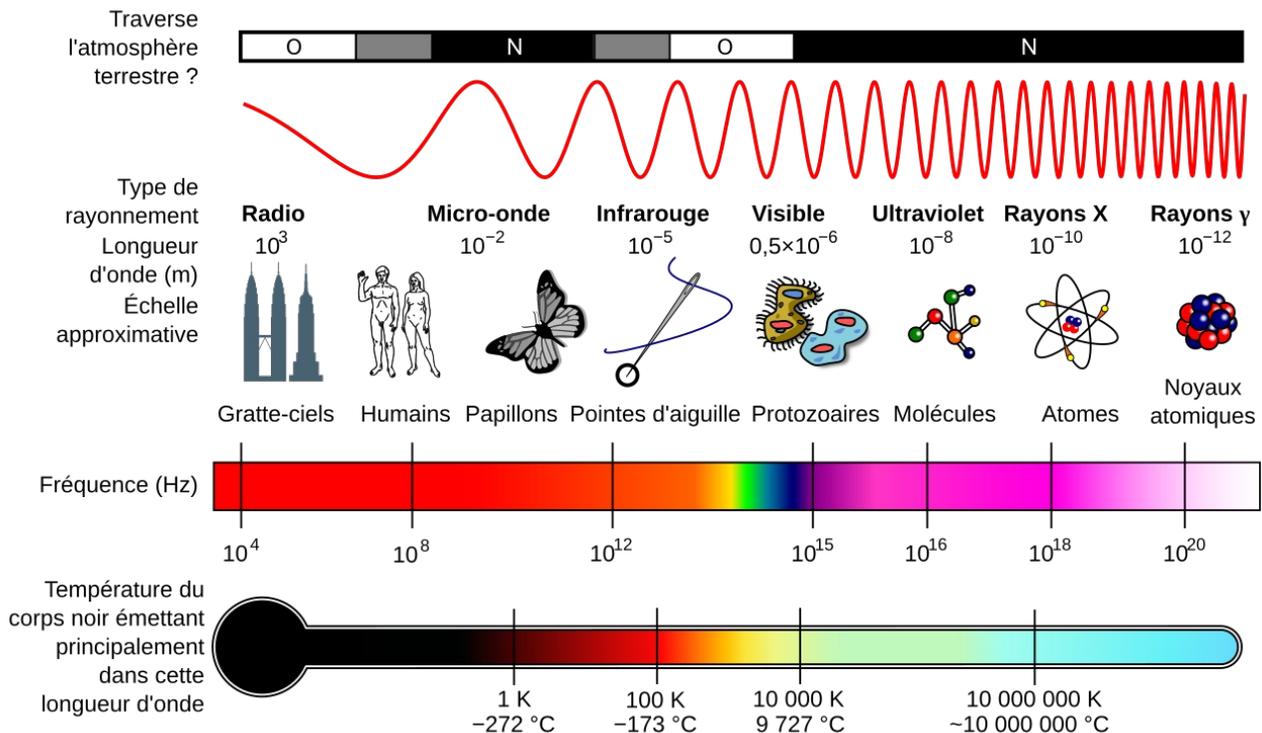


Illustration par Inductiveload, NASA. Traduction by Berru. Licence CC BY-SA 3.0.

Spectre radio et allocations de fréquences

La partie du spectre électromagnétique qui nous intéresse est le **spectre radio**, qui couvre toutes les fréquences inférieures à 300 GHz, ce qui comprend les ondes radio et les micro-ondes (aux fins qui nous intéressent, on peut en fait considérer que les micro-ondes font partie des ondes radio). Le spectre radio est divisé en **bandes de fréquences** qui sont allouées par les gouvernements à des usages spécifiques. Cette division du spectre est nécessaire pour éviter que les différentes utilisations des radiofréquences entrent en conflit les unes avec les autres (ce qu'on appelle de l'**interférence**). Les allocations de fréquences viennent aussi avec des règles, par exemple sur la puissance de transmission autorisée sur une certaine fréquence.

Au Canada, les allocations de fréquences sont administrées par *Innovation, Sciences et Développement économique Canada* (ISDE). Aux États-Unis, elles sont sous la responsabilité de la *Federal Communications Commission* (FCC).

Modulation des ondes

Les ondes radio sont utilisées pour transmettre des données en appliquant une variation dans le temps à leurs caractéristiques physiques de façon à représenter l'information. C'est ce qu'on appelle la **modulation**. Sous ses formes les plus simples, c'est la fréquence¹ ou l'amplitude² des ondes qui est

1 https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_de_fr%C3%A9quence

2 https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_d%27amplitude

modulée. Cela dit, les technologies de communication sans fil utilisées en informatique utilisent généralement des formes de modulation plus complexes et mieux adaptés à la transmission de données sous forme binaire.

Bandes de fréquences et canaux

Quand on dit par exemple qu'une certaine technologie de communication sans fil fonctionne sur la fréquence 2,4 GHz, il s'agit d'un abus de langage, car elle n'utilise pas uniquement une fréquence exacte de 2,4 GHz. Elle utilise plutôt une **bande de fréquences**, c'est-à-dire une plage de fréquences, qui commence à environ 2,4 GHz. Dans le cas du Wi-Fi par exemple, cette bande s'étend, dans la plupart des régions du monde, de 2402 MHz à 2482 MHz. De plus, chaque technologie divise habituellement sa bande de fréquences en plusieurs **canaux** d'une certaine taille. Toujours dans le cas du Wi-Fi, la bande 2,4 GHz est divisée en 13 canaux de 20 MHz chacun (si vous faites le calcul, vous constaterez qu'il y a nécessairement un chevauchement entre les canaux).

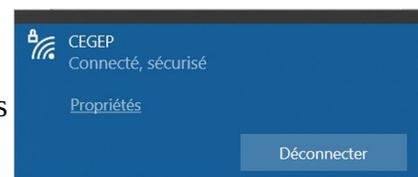
Wi-Fi

Le Wi-Fi est une technologie que vous connaissez déjà, puisque vous l'utilisez quotidiennement. Elle permet à des appareils électroniques (ordinateurs, téléphones, tablettes, objets connectés, etc) d'obtenir un accès sans fil au réseau local, de même qu'à Internet par le biais d'une passerelle sur le réseau. Il s'agit en réalité de la version sans-fil du protocole Ethernet. Un appareil connecté par Wi-Fi utilise donc les protocoles de la suite TCP/IP pour communiquer avec les autres appareils.

Dans ces notes de cours, le terme « point d'accès » sera utilisé de manière générique pour désigner un dispositif permettant de déployer un réseau Wi-Fi, que ce soit un routeur, une borne d'accès ou autre.

SSID

Vous connaissez déjà la notion de SSID d'un réseau Wi-Fi, sans peut-être le savoir. Le terme SSID, pour « *Service Set Identifier* », désigne simplement le nom identifiant un réseau Wi-Fi. Par exemple, pour vous connecter au réseau du Cégep de Sherbrooke, vous utilisez le SSID « CEGEP ». Un point d'accès Wi-Fi diffuse habituellement son SSID, ce qui permet aux utilisateurs de le voir sur leurs appareils et de le sélectionner pour se connecter au réseau correspondant.



Standard Wi-Fi

Le fonctionnement des réseaux Wi-Fi est régi par un ensemble de standards appelé *IEEE 802.11*. Des noms plus familiers, attribués par la *Wi-Fi Alliance*³, existent pour certains de ces standards, tels que Wi-Fi 6, Wi-Fi 5, etc. Voici un aperçu des différents standards existants :

3 <https://www.wi-fi.org/>

Standard	Nom familier	Année d'introduction	Débit maximal théorique
IEEE 802.11be	Wi-Fi 7	2024	46 Gigabits/s
IEEE 802.11ax	Wi-Fi 6	2019	9,6 Gigabits/s
IEEE 802.11ac	Wi-Fi 5	2013	3,46 Gigabits/s
IEEE 802.11n	Wi-Fi 4	2009	600 Mégabits/s
IEEE 802.11g	Wi-Fi 3 (<i>nommé rétroactivement⁴</i>)	2003	54 Mégabits/s
IEEE 802.11a	Wi-Fi 2 (<i>nommé rétroactivement</i>)	1999	54 Mégabits/s
IEEE 802.11b	Wi-Fi 1 (<i>nommé rétroactivement</i>)	1999	11 Mégabits/s

En règle générale, un standard d'une génération plus récente est plus performant (donc plus rapide), à condition que les appareils clients soient compatibles.

Wi-Fi 6, 6E et 7

Le standard Wi-Fi 6, introduit en 2019, a apporté les améliorations suivantes :

- Une plus grande vitesse
- Une plus faible consommation d'énergie
- Une meilleure performance dans un environnement bondé (c'est-à-dire lorsqu'il y a un grand nombre d'appareils connectés au réseau)

Wi-Fi 6E est une révision du standard Wi-Fi 6, introduite en 2021. Celle-ci ajoute une nouvelle bande de fréquences pouvant être utilisées par les réseaux Wi-Fi, ce qui peut aider à réduire les interférences puisque davantage de canaux de communication sont disponibles. Cette révision du standard Wi-Fi 6 est survenue suite à l'ouverture, aux États-Unis, d'une nouvelle bande de fréquences par la FCC.

Wi-Fi 7 permet d'atteindre des vitesses encore plus grandes que Wi-Fi 6 et Wi-Fi 6E, notamment en permettant à un client de communiquer avec le point d'accès sur plusieurs bandes de fréquences simultanément.

Ces trois standards sont rétrocompatibles, c'est-à-dire que les clients ne supportant que des standards Wi-Fi plus anciens peuvent tout de même se connecter au réseau. Ces clients ne profitent cependant pas des améliorations propres aux versions plus récentes.

Bandes de fréquences

Les réseaux Wi-Fi peuvent utiliser trois bandes de fréquences, soit 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz. La bande utilisée change la vitesse et la portée du réseau. Voici les différences entre ces bandes :

4 <https://www.pcmag.com/news/what-is-wi-fi-6-new-wi-fi-names-explained>

- **2,4 GHz**
 - Plus lent
 - Meilleure portée
 - Traverse les obstacles (tels que les murs) plus facilement, donc :
 - Permet une meilleure couverture
 - Mais est plus susceptible aux interférences avec le voisinage
 - Susceptible aux interférences avec d'autres technologies de communication sans fil, divers appareils électroniques (moniteurs pour bébé, téléphones sans fil, etc) et même les fours à micro-ondes!

- **5 GHz**
 - Plus rapide
 - Plus courte portée
 - Traverse moins bien les obstacles (tels que les murs), donc :
 - La couverture est moins bonne
 - Moins d'interférences avec le voisinage (les murs extérieurs bloquent davantage les ondes)
 - Moins d'interférences potentielles car cette bande n'est pas autant utilisée par d'autres technologies

- **6 GHz**
 - Plus rapide que 2,4 GHz et 5 GHz
 - Portée encore plus courte que 5 GHz
 - Traverse moins bien les obstacles
 - Moins d'interférences

Les bandes disponibles dépendent du standard Wi-Fi utilisé. Par exemple :

Standard Wi-Fi	Bande(s) disponible(s)
Wi-Fi 4	2,4 GHz
Wi-Fi 5	5 GHz
Wi-Fi 6	2,4 GHz et 5 GHz
Wi-Fi 6E et Wi-Fi 7	2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz

La plupart des points d'accès Wi-Fi permettent d'utiliser plusieurs bandes, soit sur le même SSID, soit sur des SSID distincts. Lorsque plusieurs bandes sont utilisées sur le même SSID, c'est l'appareil client

(s'il est compatible avec plusieurs bandes) qui choisit la bande qui lui paraît la plus appropriée (bien que certains points d'accès puissent être configurés pour forcer les clients compatibles à préférer une bande spécifique lorsque possible⁵).

Pour un réseau domestique, l'utilisation de plusieurs bandes est recommandée, puisqu'elle permet aux appareils de bénéficier des meilleures performances de la bande 5 GHz ou 6 GHz lorsque possible, tout en étant tout de même capables d'utiliser le Wi-Fi lorsque les conditions ne permettent pas d'utiliser ces bandes (par exemple, lorsque l'appareil est trop loin du routeur, ou à l'extérieur).

Attention : il ne faut pas confondre la bande 5 GHz avec le terme « 5G », qui désigne une technologie de réseau cellulaire (« 5^e génération ») et n'a rien à voir avec la fréquence des ondes.

Vitesse maximale

Lorsqu'on magasine des points d'accès Wi-Fi (par exemple, des routeurs résidentiels), il est courant de voir des termes tels que « AC1900 » ou « AX6000 ». Les deux lettres font ici référence au standard Wi-Fi utilisé (par exemple, « AC » pour Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) et « AX » pour Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax)). Les chiffres, pour leur part, font référence à la vitesse maximale supportée par le point d'accès, en Mégabits par seconde. Attention cependant : vous n'atteindrez jamais cette vitesse dans la réalité, d'abord parce qu'il s'agit de la vitesse maximale *théorique* (dans des conditions idéales), et que cette vitesse est partagée entre les bandes (par exemple, un point d'accès ayant une bande 2,4 GHz et une bande 5 GHz attribuera une partie de la vitesse à chacune de ces bandes), ainsi qu'entre tous les appareils connectés au réseau sans fil. Par ailleurs, on ne peut évidemment jamais dépasser la vitesse de la connexion Internet lorsqu'on télécharge des données depuis un hôte distant.

Sécurité et chiffrement

Vous savez déjà qu'un réseau Wi-Fi nécessite habituellement un mot de passe pour s'y connecter. Cette authentification est gérée par le standard WPA, pour « *Wi-Fi Protected Access* ». Celui-ci est né au début des années 2000 pour remplacer le standard WEP (pour « *Wired Equivalent Privacy* »), qui présentait des vulnérabilités de sécurité importantes. Il gère aussi le chiffrement des données échangées sur le réseau.

Il existe 3 versions du standard: WPA, WPA2 et WPA3. Chaque nouvelle version apporte une meilleure sécurité que la précédente. Depuis juillet 2020, les appareils utilisant le Wi-Fi doivent obligatoirement supporter le standard WPA3 pour pouvoir être certifiés par la *Wi-Fi Alliance*.

Deux modes d'authentification sont supportés par le standard :

- WPA-Personal (ou WPA-PSK, pour « *Pre-Shared Key* ») : tous les appareils se connectent au réseau à l'aide d'un même mot de passe. C'est le mode normalement utilisé pour les petits réseaux, notamment résidentiels.

5 <https://www.actiontec.com/what-is-band-steering/>

- WPA-Enterprise (ou WPA-802.1x) : ce mode d'authentification oblige chaque utilisateur à saisir un nom d'utilisateur et un mot de passe pour se connecter au réseau. Ce mode est couramment utilisé en entreprise. Pour être mis en place, il nécessite habituellement un serveur d'authentification utilisant le protocole RADIUS⁶.

Bluetooth

Le Bluetooth est une autre technologie qui vous est sans doute familière. Contrairement au Wi-Fi, le Bluetooth ne permet pas de mettre plusieurs appareils en réseau, et les appareils n'utilisent pas les protocoles de la suite TCP/IP pour communiquer entre eux. L'utilité du Bluetooth est plutôt d'échanger des données entre deux appareils sur une courte portée. Pour ce faire, il faut d'abord associer les deux appareils. Ce processus est communément désigné sous son nom anglais, le « *pairing* ».

Le Bluetooth utilise la bande de fréquences 2,4 GHz, qui est également utilisée par le Wi-Fi. Ces deux technologies peuvent donc parfois interférer l'une avec l'autre, ce qui peut causer des baisses de débit.

Il existe plusieurs versions du standard Bluetooth, la plus récente étant la version 6, dont les spécifications ont été publiées en septembre 2024⁷. Cette version permet d'atteindre des débits de transmission jusqu'à 3 Mégabits/s⁸. Ce débit est suffisant pour la transmission audio, mais le Wi-Fi est favorisé pour les usages plus exigeants (ex : transmission vidéo).

Technologies à basse consommation

Dans le domaine de la domotique⁹ ou celui des objets connectés (IoT¹⁰) en général, il est fréquent de trouver des appareils qui sont alimentés uniquement par des piles. Pensons notamment aux capteurs de température ou d'humidité, aux montres intelligentes, aux moniteurs d'activité physique (ex : Fitbit) ou encore aux balises de proximité (ex : iBeacon¹¹), soit des appareils pour lesquels il n'est pas toujours pratique de fournir une alimentation en électricité. Les technologies Wi-Fi et Bluetooth ne sont pas appropriées pour ces appareils, puisqu'elles sont énergivores et épuiserait donc les piles trop rapidement. Pour ce genre d'usage, on veut plutôt que les piles puissent alimenter les appareils pendant plusieurs mois, voire plusieurs années avant d'avoir à être remplacées. C'est pour cette raison que la plupart de ces objets utilisent plutôt des technologies de communication sans fil dites « à basse consommation ». Nous aborderons ici quatre de ces technologies :

- Bluetooth Low Energy (BLE)
- Zigbee
- Z-Wave

6 https://fr.wikipedia.org/wiki/Remote_Authentication_Dial-In_User_Service

7 <https://www.ezurio.com/resources/blog/bluetooth-6-what-s-new-in-the-latest-bluetooth-release>

8 <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>

9 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Domotique>

10 https://fr.wikipedia.org/wiki/Internet_des_objets

11 <https://fr.wikipedia.org/wiki/IBeacon>

- Thread

Ces quatre technologies ont en commun d'être conçues pour des cas d'utilisation où de petites quantités de données doivent être échangées de façon intermittente. C'est ce qui permet d'optimiser la consommation d'énergie requise pour leur fonctionnement. Les technologies Wi-Fi et Bluetooth, pour leur part, sont plus appropriées pour les appareils qui doivent échanger de plus grandes quantités de données de manière constante.

Bluetooth Low Energy (BLE)

La technologie Bluetooth Low Energy, souvent désignée sous son acronyme BLE, fait partie de la spécification de Bluetooth depuis sa version 4. Bluetooth et BLE ne sont cependant pas compatibles entre eux, et un appareil Bluetooth ne peut donc pas communiquer avec un appareil BLE. Cela dit, la plupart des appareils mobiles récents supportent les deux standards. On peut donc communiquer avec un appareil BLE directement à partir d'un téléphone intelligent, ce qui est pratique pour interagir avec des objets connectés.

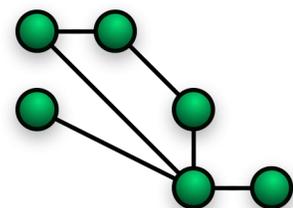
BLE utilise la bande de fréquences 2,4 GHz, comme Bluetooth et Wi-Fi. La principale différence avec Bluetooth est qu'un appareil BLE demeure « en dormance » jusqu'à ce qu'une connexion survienne, ce qui permet de consommer moins d'énergie. Les connexions ne durent en général que quelques millisecondes, puisque les données à transmettre sont habituellement minimes. Il existe aussi des utilisations de BLE « sans connexion », c'est-à-dire qu'un appareil peut diffuser des données en BLE sans devoir établir de connexion (association ou *pairing*) avec les récepteurs (pensons par exemple à un capteur qui diffuse la température dans une pièce à des intervalles régulières pour que d'autres appareils puissent utiliser cette information).

BLE supporte des débits de transmission entre 125 Kilobits/s et 2 Mégabits/s.

Zigbee

Zigbee est un autre protocole de communication sans fil à basse consommation et à bas débit conçu principalement pour la domotique. Bien qu'il s'agisse d'une technologie à basse consommation, on ne la trouve pas uniquement dans des appareils alimentés par pile. Elle est par exemple fréquemment utilisée par les ampoules intelligentes et les interrupteurs intelligents. L'utilisation de cette technologie au lieu du Wi-Fi peut avoir pour avantages de désencombrer le réseau Wi-Fi et forcer le contrôle local des objets connectés (par opposition aux appareils Wi-Fi qui sont souvent contrôlés par des serveurs distants et qui nécessitent donc une connexion Internet fonctionnelle pour être utilisés – ces appareils souffrent par ailleurs parfois de vulnérabilités qui peuvent compromettre la sécurité d'un réseau).

Une particularité importante de Zigbee (et de son principal compétiteur, Z-Wave) est qu'il peut créer automatiquement un réseau maillé (Mesh), c'est-à-dire un réseau pair à pair dont les nœuds peuvent relayer les données à d'autres nœuds. Un réseau Zigbee comprend trois types de nœuds :



- Un **coordonnateur Zigbee** (ZC pour « *Zigbee Coordinator* ») : c'est l'appareil qui crée et coordonne le réseau. Tout réseau Zigbee en comprend exactement un.
- Un **routeur Zigbee** (ZR pour « *Zigbee Router* ») : c'est un appareil qui fait partie du réseau (par exemple, une prise intelligente) et qui peut aussi servir de relais dans le réseau maillé. Un réseau Zigbee peut en comprendre plusieurs. Les appareils de ce type permettent d'augmenter la robustesse et la portée du réseau. Il s'agit obligatoirement d'appareils branchés à l'alimentation électrique, puisqu'ils doivent demeurer éveillés en permanence afin d'être en mesure de relayer les données. On dit aussi qu'il s'agit d'appareils « à fonctionnalité complète » (traduction libre de « *Full-Function Device* » ou FFD) puisqu'ils implémentent la fonctionnalité complète de Zigbee (ils accomplissent la fonction pour laquelle ils ont été prévus ET agissent comme relais).
- Un **point de terminaison Zigbee** (traduction libre de « *Zigbee Endpoint Device* » ou ZED) : c'est un appareil qui fait partie du réseau Zigbee, mais qui ne peut pas relayer les données aux autres nœuds du réseau. Il s'agit typiquement d'appareils alimentés par pile (par exemple, des capteurs), on ne veut donc pas qu'ils agissent comme relais, car cela les forcerait à demeurer éveillés en tout temps, ce qui viderait la pile rapidement. On dit donc qu'il s'agit d'appareils « à fonctionnalité réduite » (traduction libre de « *Reduced Function Device* » ou RFD).

Zigbee utilise la bande de fréquences 2,4 GHz, tout comme Wi-Fi, Bluetooth et BLE. Un réseau Zigbee peut donc interférer avec ces technologies. Jusqu'à 65 000 appareils peuvent faire partie d'un réseau Zigbee. Cette technologie permet des débits de transmission jusqu'à 250 Kilobits/s.

Zigbee est un protocole ouvert dont il existe plusieurs variantes. Cette particularité cause parfois des problèmes d'interopérabilité, c'est-à-dire que certains appareils Zigbee ne peuvent pas interagir avec certains autres appareils Zigbee. La version 3.0 du protocole vise à résoudre ce problème en unifiant les différentes variantes. Un appareil Zigbee 3.0 devrait donc théoriquement pouvoir interagir sans problème avec tous les autres appareils Zigbee 3.0, à condition d'avoir été certifié comme tel par la *Connectivity Standards Alliance* (anciennement la *Zigbee Alliance*). Avant cette version, même des appareils certifiés pouvaient être incompatibles entre eux.

Z-Wave

Z-Wave est le principal compétiteur de Zigbee, car il s'agit d'une technologie assez semblable. Comme Zigbee, il s'agit d'une technologie de communication sans fil à basse consommation et à bas débit. Comme Zigbee, elle peut créer automatiquement un réseau maillé dont les nœuds (à l'exception de ceux alimentés par pile) agissent comme relais de données pour les autres nœuds. Les principales différences avec Zigbee sont les suivantes :

- Z-Wave utilise la bande de fréquences 900 MHz, ce qui permet aux appareils du réseau d'avoir une meilleure portée en plus d'éviter les interférences avec les réseaux Wi-Fi, Bluetooth et BLE.
- Z-Wave supporte un maximum de 232 appareils sur un même réseau, contre 65 000 pour Zigbee.

- Z-Wave permet un débit jusqu'à 100 Kilobits/s, contre 250 Kilobits/s pour Zigbee.
- Le standard Z-Wave était autrefois complètement fermé, mais a été partiellement ouvert par la *Z-Wave Alliance* au cours des dernières années.
- L'interopérabilité entre appareils Z-Wave est meilleure que pour Zigbee (bien que Zigbee 3.0 améliore cet aspect).

L'utilisation de la bande 900 MHz est indéniablement le plus grand avantage de Z-Wave par rapport à Zigbee. Malgré cet avantage, il est difficile de trouver des appareils Z-Wave pour certains types de produits, tels que les ampoules intelligentes. D'autres types de produits utilisant cette technologie sont cependant plus communs, comme les capteurs (d'ouverture de porte, de température, de mouvement, etc), les prises de courant, interrupteurs, thermostats intelligents et systèmes de sécurité. Les appareils utilisant Z-Wave sont par ailleurs souvent plus coûteux que ceux utilisant Zigbee.

Thread

Thread est un joueur relativement nouveau dans le milieu des technologies de communication sans fil. Il utilise la même couche physique que Zigbee et partage donc plusieurs caractéristiques avec lui, telles que la fréquence, le débit et la formation d'un réseau Mesh. Il présente cependant aussi des particularités :

- Thread permet à des appareils de communiquer directement les uns avec les autres, alors qu'un réseau Zigbee nécessite un contrôleur central.
- Thread utilise le protocole IPv6, les appareils peuvent donc être adressés de la même manière que sur un réseau Ethernet ou Wi-Fi.
- Zigbee permet de contrôler des appareils directement, tandis que Thread n'est qu'un protocole de communication qui nécessite l'utilisation d'un autre protocole sur une couche supérieure pour contrôler les appareils.
 - Le protocole en question s'appelle Matter, et il peut aussi utiliser le Wi-Fi comme technologie de communication. Un appareil utilisant Matter n'utilise donc pas forcément Thread.

Synthèse

Le tableau suivant¹² présente une synthèse de la comparaison entre les technologies Wi-Fi, Bluetooth, Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee, Z-Wave et Thread :

Caractéristique	Wi-Fi	Bluetooth	Bluetooth Low Energy (BLE)	Zigbee	Z-Wave	Thread
Fréquence(s)	2,4 GHz / 5 GHz / 6 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	900 MHz	2,4 GHz
Interférence	Interférence possible en 2,4 GHz avec Bluetooth, BLE, Zigbee et Thread	Interférence possible avec Wi-Fi, BLE, Zigbee et Thread	Interférence possible avec Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee et Thread	Interférence possible avec Wi-Fi, Bluetooth, BLE et Thread	Pas d'interférence avec les autres technologies!	Interférence possible avec Wi-Fi, Bluetooth, BLE et Zigbee
Réseau maillé (Mesh)	Possible avec des routeurs Mesh	Non	Possible	Automatique	Automatique	Automatique
Consommation d'énergie	Élevée	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Faible
Débit	Débit théorique maximal de 9,6 Gigabits/s en Wi-Fi 6	Jusqu'à 3 Mégabits/s	Jusqu'à 2 Mégabits/s	Jusqu'à 250 Kilobits/s	Jusqu'à 100 Kilobits/s	Jusqu'à 250 Kilobits/s
Disponibilité des appareils	Excellente	Excellente pour les périphériques sans fil tels que des écouteurs, claviers, souris, manettes de jeu, etc.	Faible, mais en augmentation	Modérée	Faible, à part pour les capteurs	Faible, mais en augmentation
Coût des appareils	Faible	Moyen	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé

12 Inspiré de ce tableau : <https://www.smarthomepoint.com/Zigbee-zwave-wifi-bluetooth-comparison/#a-comparison-of-Zigbee-vs-z-wave-vs-wifi-vs-bluetooth>

Références

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Onde_radio
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Onde_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique
- <https://plbrault.com/shortwave-listening/#radio-spectrum>
- <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8390181/spectre-des-radiofrequences>
- <https://ised-isde.canada.ca/site/gestion-spectre-telecommunications/fr/savoir-plus/documents-cles/consultations/tableau-canadien-dattribution-bandes-frequences>
- <https://www.ntia.gov/book-page/who-regulates-spectrum>
- <https://notes.networklessons.com/wireless-wi-fi-24ghz-frequency-band-and-channels>
- <https://www.lifewire.com/definition-of-service-set-identifier-816547>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>
- <https://www.pcmag.com/news/what-is-wi-fi-6-new-wi-fi-names-explained>
- <https://www.minim.com/blog/wifi-4-vs-wifi-5-vs-wifi-6>
- <https://www.youtube.com/watch?v=Mx5-T8ZwxbU>
- <https://www.howtogeek.com/368332/wi-fi-6-what%E2%80%99s-different-and-why-it-matters/>
- <https://www.actiontec.com/what-is-band-steering/>
- <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/wifi-6.html>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/5G>
- <https://www.pcmag.com/how-to/what-do-those-ac-and-ax-numbers-on-your-wi-fi-router-mean>
- <https://ham.stackexchange.com/questions/5547/what-is-the-difference-between-channel-frequency-band-in-rf>
- https://www.youtube.com/watch?v=B_vwGEbi36Q
- <https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/wpa-wifi-protected-access/>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Remote_Authentication_Dial-In_User_Service
- <https://www.hellotech.com/blog/what-is-the-difference-between-bluetooth-and-wifi>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
- <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>

- <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-3/>
- <https://www.ezurio.com/resources/blog/bluetooth-6-what-s-new-in-the-latest-bluetooth-release>
- <https://volantechnology.com/blog/bluetooth-vs-ble/>
- <https://www.link-labs.com/blog/bluetooth-vs-bluetooth-low-energy>
- <https://www.smarthomepoint.com/Zigbee-zwave-wifi-bluetooth-comparison/>
- <https://www.hackster.io/news/comparison-of-wireless-technologies-bluetooth-wifi-ble-Zigbee-z-wave-6lowpan-nfc-wifi-eece5593d80f>
- <https://restechtoday.com/making-sense-of-smart-home-protocols-now-and-in-the-future/>
- https://predictabledesigns.com/wireless_technologies_bluetooth_wifi_Zigbee_gsm_lte_lora_nb-iot_lte-m/
- https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_Low_Energy
- <https://stackoverflow.com/questions/61320592/does-ble-data-transfer-require-pairing-pairless-bt-data-transfer#answer-61327312>
- <https://www.blackhillinfosec.com/understanding-Zigbee-and-wireless-mesh-networking/>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Topologie_mesh
- <https://www.digi.com/solutions/by-technology/Zigbee-wireless-standard>
- <https://csa-iot.org/all-solutions/Zigbee/Zigbee-faq/>
- <https://www.theverge.com/2019/12/19/21029661/zwave-open-standard-radios-smart-home-multiple-vendors-silicon-labs>
- <https://www.the-ambient.com/guides/zwave-z-wave-smart-home-guide-281>
- <https://news.silabs.com/2019-12-19-Silicon-Labs-and-Z-Wave-Alliance-Expand-Smart-Home-Ecosystem-by-Opening-Z-Wave-to-Silicon-and-Stack-Suppliers>
- <https://www.cnx-software.com/2019/12/24/z-wave-open-standard-to-enable-third-party-z-wave-silicon-and-stack-suppliers/>
- <https://docs.silabs.com/z-wave/latest/z-wave-docs/zwave-specification>
- <https://www.home-assistant.io/blog/2024/05/08/zwave-is-not-dead/>
- <https://www.nxp.com/docs/en/brochure/75017677.pdf>
- <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/recent-enhancements/mesh/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=0JC4tNe0OS4>
- <https://www.journaldugeek.com/2023/03/30/matter-et-thread-cest-quoi-ces-deux-nouveaux-standards-de-la-domotique/>

- <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Difference-between-Zigbee-and-Thread.html>
- <https://www.theverge.com/23165855/thread-smart-home-protocol-matter-apple-google-interview>
- <https://www.home-assistant.io/integrations/thread/>
- <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/products/docs/wireless/wi-fi-6e.html>
- <https://www.theverge.com/2020/4/23/21231623/6ghz-wifi-6e-explained-speed-availability-fcc-approval>
- <https://www.tomsguide.com/face-off/wi-fi-6-vs-wi-fi-6e-whats-the-difference>
- <https://www.tomsguide.com/face-off/wi-fi-6e-vs-wi-fi-7-whats-the-difference>
- <https://www.konsyse.com/articles/wi-fi-6e-standard-and-6-ghz-wi-fi-band-pros-and-cons/>