

Chapitre 2. Réseaux personnels sans-fils (WPAN)

Réseaux WPAN.....	69
Caractéristiques du WPAN.....	69
Avantages du WPAN.....	70
Inconvénients du WPAN.....	70
Standards du WPAN.....	70
La norme IrDA.....	70
Caractéristiques de l'infrarouge.....	71
La norme Bluetooth.....	71
La norme IEEE802.15.....	71
IEEE 802.15.1 : WPAN/Bluetooth.....	72
IEEE 802.15.2 : WPAN 2.....	72
IEEE 802.15.3 : WPAN haut débit.....	72
IEEE 802.15.4 : WPAN faible débit- Longue durée de vie de la batterie.....	73
Classification des réseaux WPAN.....	73
Applications du WPAN.....	73
Topologies WPAN.....	73
Principes de base de la Technologie Bluetooth.....	73
Caractéristiques du Bluetooth.....	75
Réseau mobile ad-hoc.....	75
Utilisation du Bluetooth.....	76
Applications du réseau Bluetooth.....	76
Différentes topologies de réseaux Bluetooth.....	77
Réseaux Piconets.....	77
Réseaux Scatternets.....	78
Différentes Versions du Bluetooth.....	79
Protocoles Bluetooth.....	82
Description des différentes couches.....	83
a) La couche Radio Fréquence (RF) – Couche Physique.....	83
Techniques de communication.....	83
Puissance dans le Bluetooth.....	86
Modulation dans le Bluetooth.....	87
Synchronisation Emetteur / Récepteur.....	88
Force du signal et sensibilité du récepteur.....	89

Principe de communication des informations au sein du réseau Bluetooth.....	89
b) La couche bande de base (baseband).....	91

Réseaux WPAN

- ⇒ Le réseau personnel sans-fil, appelé également réseau individuel sans-fil ou réseau domestique (privé) sans-fil et noté WPAN pour Wireless Personal Area Network, autorise la communication et l'échange d'informations entre ordinateurs, imprimantes, téléphones mobiles et autres dispositifs, dans un rayon limité ;
- ⇒ Il concerne les réseaux sans-fil d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines mètres.

Caractéristiques du WPAN

- ⇒ Contrairement au WLAN (Wireless Local Area Network) où la configuration de l'infrastructure est requise, la connexion WPAN implique peu d'infrastructure ;
- ⇒ Le WPAN fournit des solutions peu coûteuses et économiques en termes de consommation d'énergie pour une large gamme d'appareils à une courte distance ;
- ⇒ La connexion entre les appareils se fait principalement dans le bâtiment ou dans une pièce.
- ⇒ **Exemple** : une connexion à travers laquelle deux amis discutent et partagent des documents dans la même pièce.
- ⇒ Quelques autres exemples de WPAN incluent les souris sans-fil, les appareils portables, les clés USB, les appareils photo numériques, le *Bluetooth*, les thermostats, les systèmes de sécurité, les commandes d'éclairage, les capteurs de mouvement, les capteurs de fuite, etc ;
- ⇒ C'est un petit réseau personnel, à utiliser n'importe où ;
- ⇒ Il peut prendre en charge une large gamme d'appareils ;
- ⇒ Aucune connectivité complexe (connectivité réseau) n'est exigée.



Figure.1. Quelques exemples du WPAN

Avantages du WPAN

Certains des avantages du WPAN incluent :

Faible coût : Les WPAN permettent de connecter plusieurs appareils sans avoir une infrastructure appropriée.

Souplesse : Si on a besoin d'utiliser plusieurs appareils en même temps pour différentes tâches, un WPAN apportera la flexibilité nécessaire. Par exemple, impression des documents depuis un smartphone.

Sécurité : Les WPAN ont des options de sécurité qui permettent de bloquer des appareils spécifiques, ce qui signifie qu'on peut contrôler tout ce qui veut accéder au réseau.

Facilité d'utilisation : La plupart des appareils intelligents et des nouvelles technologies ont des capacités à intégrer facilement un réseau WPAN.

Mobilité : La mobilité est devenue une nécessité pour l'ensemble des utilisateurs du sans-fil. Le WPAN permet aux utilisateurs d'accéder aux informations où qu'ils se trouvent tant qu'ils se trouvent toujours dans la portée de la zone WPAN.

Inconvénients du WPAN

- ⇒ Courte portée ;
- ⇒ Vitesse de transfert faible.

Standards du WPAN

- ⇒ De nombreuses normes sont disponibles pour les réseaux WPAN ;
- ⇒ Chaque norme a ses avantages et inconvénients ;
- ⇒ Chaque norme est adaptée à des scénarios d'application spécifiques ;
- ⇒ Dans certains cas, plusieurs normes peuvent effectuer une application spécifique. Par conséquent, des facteurs non techniques tels que le coût et la disponibilité seront pris en compte pour le choix de la technologie la plus appropriée.

Dans ce qui suit, nous présentons les principales normes dans le réseau WPAN.

La norme IrDA

- ⇒ L'IrDA (pour « Infrared Data Association » en anglais) est une organisation internationale qui crée des normes de connexion de données infrarouges interopérables et à faible coût ;
- ⇒ Elle prend en charge une large gamme d'appareils, d'ordinateurs et d'appareils de communication ;
- ⇒ Elle vise généralement à fournir un transfert de données sans-fil à grande vitesse, à courte portée, en visibilité directe et point à point ;
- ⇒ Plus de 300 millions d'appareils compatibles IrDA existe, ce qui en fait d'elle l'une des technologies sans-fil les plus répandues ;
- ⇒ L'objectif initial de l'IrDA était de fournir une technologie de remplacement de câble, un peu comme les autres normes WPAN ;
- ⇒ L'idée était que deux ordinateurs pouvaient communiquer simplement en les pointant l'un vers l'autre ;
- ⇒ **Exemple** : pour imprimer un document, il vous suffit de pointer le port infrarouge (IR) vers l'imprimante pour pouvoir envoyer les données.

Caractéristiques de l'infrarouge

- ⇒ Portée de communication jusqu'à 1 mètre (Voire même 2 mètres dans des cas) ;
- ⇒ Basse consommation pour une communication jusqu'à 20 centimètres ;
- ⇒ Communication bidirectionnelle ;
- ⇒ Transmission de données avec un débit allant de 9.6 Kbps à 4 Mbps.

La norme Bluetooth

- ⇒ Le *Bluetooth* est une norme permettant la communication sans-fil entre les ordinateurs portables, les téléphones portables et les appareils portables ;

- ⇒ Contrairement à la technologie Infrarouge, le *Bluetooth* ne nécessite pas la visibilité directe entre les appareils ;
- ⇒ Il est capable de communiquer à travers des barrières physiques, généralement avec une portée de 10 mètres ;
- ⇒ Avec des amplificateurs de puissance, une portée de 100 mètres peut être atteinte ;
- ⇒ Le *Bluetooth* utilise le spectre de fréquences autour de 2,4 GHz (sans licence) pour la communication ;
- ⇒ Avec les futures versions de *Bluetooth*, on peut passer à plusieurs Mbps.

La norme IEEE802.15

- ⇒ 802.15 est une spécification pilotée par l'Institut IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), pour développer des normes consensuelles (توافقية) pour les réseaux sans-fil à courte portée ou les réseaux personnels sans-fil ;
- ⇒ Cet organisme a des objectifs similaires à ceux du *Bluetooth* du fait qu'il cherche à aborder la mise en réseau sans-fil d'appareils informatiques portables et mobiles tels que les PCs, les téléphones mobiles, les périphériques et l'électronique grand public ;
- ⇒ Le groupe de travail 802.15 WPAN a été créé en 1999 dans le cadre du comité de normalisation des réseaux locaux et métropolitains de l'IEEE.
- ⇒ C'est un Groupe de travail (WG pour Working Group en anglais) très spécialisé dans les réseaux sans-fil ;



Figure.2. Logo de la norme IEEE802.15

- ⇒ Au moment de sa création, le groupe de travail 802.15 WPAN était au courant des spécifications *Bluetooth* et en a utilisé certaines parties comme base de la norme 802.15 ;
- ⇒ Pour atteindre ses objectif, quatre groupes de travail ont été créés à partir du 802.15, chacun travaillant sur des composants spécifiques de la spécification 802.15. Ces groupes sont donnés comme suit :

IEEE 802.15.1 : WPAN/Bluetooth.

- ⇒ Destiner à satisfaire les contraintes des réseaux de catégorie C (*Bluetooth*), ce groupe de travail a créé la norme avancée de la spécification *Bluetooth* v1.1.

IEEE 802.15.2 : WPAN 2

- ⇒ Destiner à gérer les interférences avec les autres réseaux utilisant la bande des 2.4 GHz, ce groupe de travail s'est concentré sur le développement de pratiques recommandées pour faciliter la coexistence des technologies WPAN (802.15) et WLAN (802.11) ;
- ⇒ Une partie de cette tâche consiste à développer un modèle de coexistence pour quantifier l'interférence mutuelle d'un WPAN et d'un WLAN.

IEEE 802.15.3 : WPAN haut débit

- ⇒ Destiner à satisfaire les contraintes des réseaux de catégorie B (UWB - Ultra-Wide Band) très performant avec un débit $\sim 1\text{Gbit/s}$ sur 10 m ;
- ⇒ En plus des débits de données élevés, le 802.15.3 doit également fournir un moyen de solutions à faible consommation d'énergie et à faible coût pour répondre aux besoins de l'électronique grand public portable, de l'imagerie numérique et des applications multimédias.

IEEE 802.15.4 : WPAN faible débit- Longue durée de vie de la batterie

- ⇒ Destiner à satisfaire les contraintes des réseaux de catégorie A (ZigBee - très faible coût et consommation, bas débit) ;
- ⇒ Ce groupe de travail est chargé d'établir une solution à faible débit de données (200 Kbps maximum) avec une longue durée de vie de la batterie (de plusieurs mois à plusieurs années) et une faible complexité ;
- ⇒ Il est destiné à fonctionner dans la bande ISM ;
- ⇒ Il cible les capteurs, les jouets interactifs, les badges intelligents, la domotique (les différentes techniques permettant de contrôler, de programmer et d'automatiser une habitation) et les télécommandes.

Classification des réseaux WPAN

- ⇒ Selon la norme IEEE, le réseau personnel sans-fil est classé en 3 classes :
 - 1) WPAN haut débit (HR-WPAN) : Il est défini dans la norme IEEE 802.15.3. Le débit de données est $> 20\text{ Mbps}$;
 - 2) WPAN moyen débit (MR-WPAN) : Il est défini dans la norme IEEE 802.15.1. Le débit de données est de 1 Mbit/s ;
 - 3) WPAN bas débit (LR-WPAN) : Il est défini dans la norme IEEE 802.15.4. Le débit de données est $< 0,25\text{ Mbps}$.

Applications du WPAN

- ⇒ Connexion de différentes parties d'un réseau entre elles à courte portée pour les applications multimédias ;
- ⇒ Connexion des appareils mains libres ;
- ⇒ Applications de capteurs industriels.

Topologies WPAN

Le WPAN, courte portée, prend en charge les topologies suivantes du réseau :

- ⇒ Topologie en étoile ;
- ⇒ Topologie maillée ;
- ⇒ Topologie d'arborescence de cluster (الشجرة العنقودية).

Principes de base de la Technologie Bluetooth

- ⇒ Le terme « *Bluetooth* » se traduit en anglais par « dent bleue » ;
- ⇒ C'est le surnom du roi danois Harald II (910-986) qui unifia la Suède et la Norvège et introduisit le christianisme dans les pays scandinaves ;



Figure.3. Technologie Bluetooth

La technologie *Bluetooth* a été inventée par l'entreprise suédoise Ericsson en 1994 ;

- ⇒ Un groupe d'intérêt baptisé *Bluetooth SIG* (Special Interest Group) a été formé afin de produire les spécifications *Bluetooth 1.0* ;
- ⇒ Le SIG réunissait plus de 2000 entreprises telles que Ericsson, IBM, Intel, Microsoft, Motorola, Nokia, Toshiba...

Interface Bluetooth

- ⇒ Le *Bluetooth* est une technologie de réseaux sans-fil à faible portée (quelques dizaines de mètres) ;
- ⇒ Il permet de relier plusieurs appareils entre eux sans liaison filaire ;
- ⇒ Il utilise les ondes radio comme support de transmission ;
- ⇒ La liaison radio fonctionne dans une bande de fréquence située autour de la fréquence $2,45\text{GHz}$ (Bande de fréquence libre dans la plupart des pays) ;
- ⇒ En utilisant la bande ISM, les équipements *Bluetooth* sont utilisés partout dans le monde ;
- ⇒ Comme le montre la figure (4), une interface *Bluetooth* est constituée d'un émetteur, d'un récepteur, d'un contrôleur et d'une interface avec le système hôte (ordinateur en réseau qui fournit des services à d'autres systèmes ou utilisateurs).

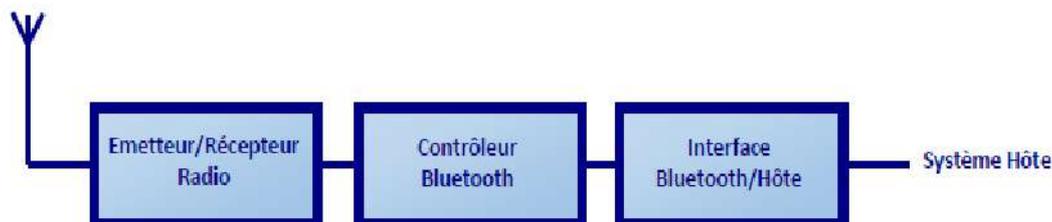


Figure.4. Interface Bluetooth

- ⇒ La technologie *Bluetooth* permet également à deux appareils, situés dans deux pièces différentes, de se relier ;
- ⇒ Par l'utilisation d'amplificateur, la portée est limitée à 100 m et diminue suivant les obstacles rencontrés (murs, etc...).

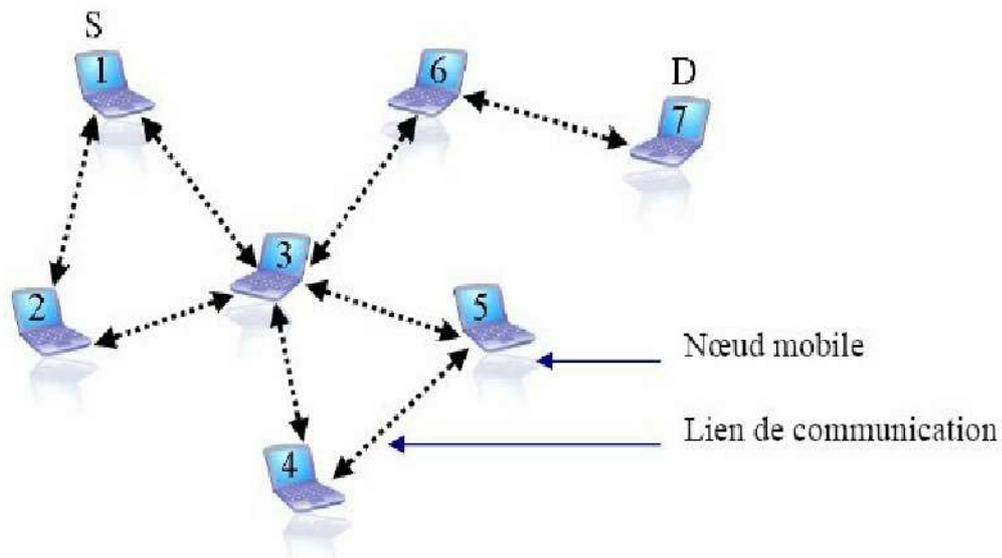
Caractéristiques du Bluetooth

Les principales caractéristiques de la technologie *Bluetooth* sont les suivantes :

- ⇒ Faible coût ;
- ⇒ Faible puissance d'émission ;
- ⇒ Une courte distance d'émission (quelques dizaines de mètres) ;
- ⇒ Une faible consommation d'énergie (donc adapté aux produits portables) ;
- ⇒ Un débit modeste (quelques Mbps pour les dernières versions) ;
- ⇒ Une topologie de réseau ad-hoc ;
- ⇒ Configurable dynamiquement ;
- ⇒ Permet le transfert des voix et des données ;
- ⇒ Destiné à un usage personnel (PAN : Personal Area Network) ;
- ⇒ Il a une certification *Bluetooth* pour assurer la compatibilité des produits entre eux.

Réseau mobile ad-hoc

Un réseau mobile ad-hoc ou MANET (Mobile Ad-hoc Network) est un réseau local sans-fil, sans infrastructure et avec un contrôle réparti. Il peut être défini comme étant un ensemble de nœuds, pouvant être mobiles, interconnectés et communicants entre eux sans l'aide de support fixes et d'une administration centralisée.



⇒ Figure.5. Réseau Ad-hoc sans infrastructure

Utilisation du Bluetooth

L'utilisation de *Bluetooth* peut être globalement classée en trois domaines.

Points d'accès pour les données et la voix : Les transmissions de voix et de données en temps réel sont assurées par *Bluetooth* en connectant, avec une liaison sans-fil, des périphériques réseau portables et fixes.

Remplacement de câble : Le *Bluetooth* remplace le besoin d'un grand nombre de fils et de câbles de réseaux câblés. Les connexions peuvent être établies instantanément et sont conservées même lorsque les appareils ne sont pas à portée. La portée des appareils est généralement de 10 m. Cependant, la portée peut être étendue en utilisant des amplificateurs.

Mise en réseau ad-hoc : comme nous l'avons déjà discuté précédemment, les réseaux ad hoc sont formés de manière impromptue (Qui n'est pas préparée à l'avance) par les périphériques réseau en contournant le besoin d'un point d'accès central tel qu'un routeur. Les réseaux *Bluetooth* sont de nature ad-hoc puisqu'un appareil compatible *Bluetooth* peut établir une connexion instantanée avec un autre appareil compatible *Bluetooth* dès qu'il est à sa portée.

Applications du réseau Bluetooth

Certaines des applications courantes de *Bluetooth* sont données comme suit :

- ⇒ Dans les ordinateurs portables et les PC sans-fil ;
- ⇒ Dans les téléphones portables et les PDA (Assistant Numérique Personnel) ;
- ⇒ Dans les imprimantes et les casques sans-fil ;
- ⇒ Dans les réseaux PAN sans-fil (réseaux personnels) et même les LAN (Réseaux locaux) ;
- ⇒ Pour transférer des fichiers de données, des vidéos et des images MP3 ou MP4 ;
- ⇒ Dans les périphériques sans-fil comme la souris et les claviers.
- ⇒ Dans les équipements d'enregistrement de données (Audio, Vidéo, etc) ;
- ⇒ Dans la transmission à courte portée des données des capteurs de santé des appareils médicaux vers un téléphone mobile, un décodeur ou une télésanté dédiée ;
- ⇒ Domotique : gestion du chauffage électrique, de l'éclairage, des appareils électroménagers, de l'arrosage automatique
- ⇒ Industrie : cette technologie de communication sans fil fait avant tout progresser l'industrie en connectant ensemble les machines et les installations de fabrication, permettant ainsi une large automatisation des processus de production.

Différentes topologies de réseaux Bluetooth

- ⇒ La technologie *Bluetooth* doit pouvoir fonctionner dans des réseaux ad-hoc pouvant faire partie de réseaux mondiaux, réseaux autonomes ou la combinaison des deux ;
- ⇒ La technologie *Bluetooth* permet différents types de connexions ;
- ⇒ Les appareils *Bluetooth* d'une connexion sont soit maître soit esclave ;
- ⇒ Dans une connexion point à point unique, un appareil est maître et l'autre appareil est esclave ;
- ⇒ Les connexions point à multipoint sont également autorisées. Ici, un appareil sera maître et tous les autres appareils esclaves ;
- ⇒ Un réseau *Bluetooth* est un réseau sans station de base (ad-hoc) ;
- ⇒ Ce réseau est auto-configurable : deux machines mobiles se retrouvant dans le même secteur peuvent se reconnaître puis échanger des données.

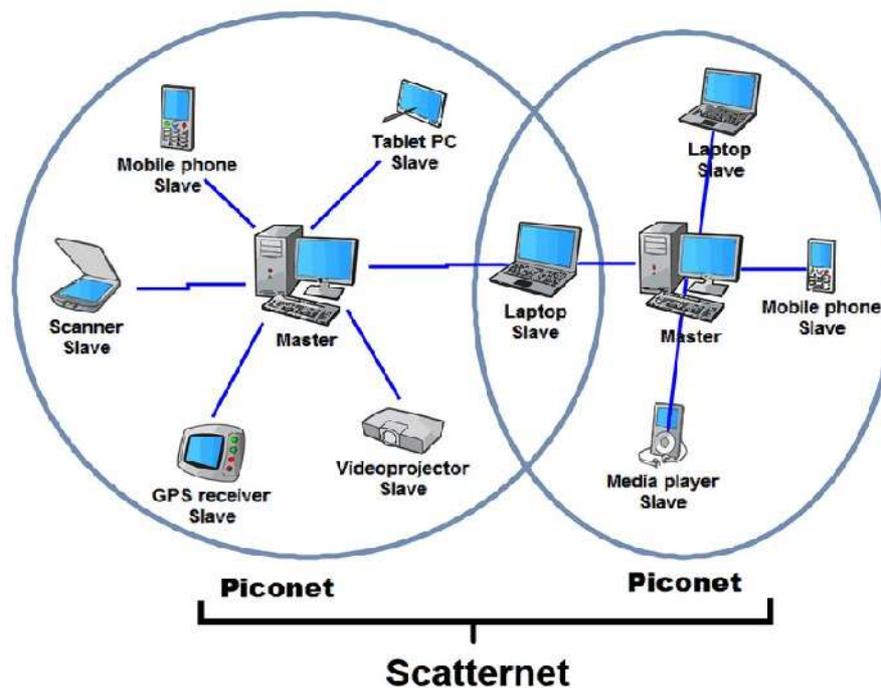


Figure.6. Différentes topologies du réseau Bluetooth

Dans ce qui suit, les différents types de topologies utilisées dans la communication *Bluetooth* et leurs applications seront discutés.

Réseaux Piconets

- ⇒ Un « piconet » est un réseau qui se crée de manière automatique quand plusieurs périphériques « *Bluetooth* » sont dans un même rayon (10 m) ;
- ⇒ Il est constitué d'un maître et de sept (7) esclaves actifs au maximum (topologie en étoile) ;
- ⇒ La communication est établie entre le maître et un esclave ;
- ⇒ Si deux esclaves (appartenant au même piconet) veulent établir une communication, ils doivent obligatoirement passer par le maître (les esclaves ne peuvent pas communiquer entre eux) ;
- ⇒ Tous les esclaves du « piconet » sont synchronisés sur l'horloge du maître ;
- ⇒ Au niveau de la bande de base, la communication n'est possible qu'entre un maître et ses esclaves ;
- ⇒ C'est le maître qui détermine la fréquence du saut pour tout le piconet.

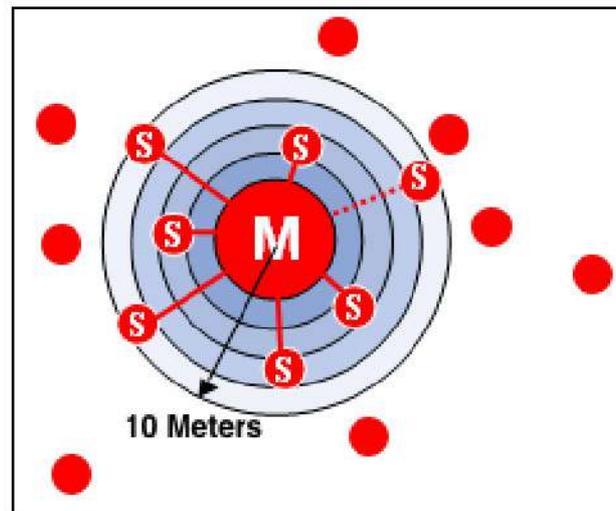


Figure.7. Réseau Bluetooth Piconet

Réseaux Scatternets

- ⇒ Le Scatternet caractérise plusieurs piconets connectés ensemble, soit par des esclaves qui sont membres de plus d'un piconet ou aussi le cas de la présence de plusieurs piconets connectés ensemble par un esclave dans un piconet qui est maître dans un autre piconet (Voir les figures 8 et 9);
- ⇒ Ces interconnexions sont possibles car les périphériques esclaves peuvent avoir plusieurs maîtres, les différents piconets peuvent donc être reliés entre eux (Voir les figures 8 et 9).

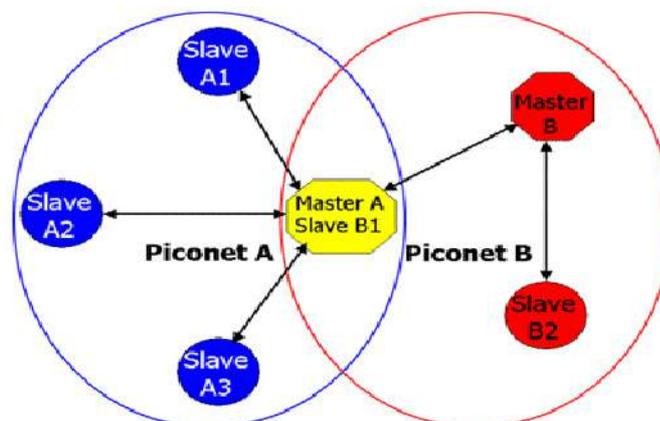


Figure.8. Exemple 1 de Réseau Bluetooth Scatternet

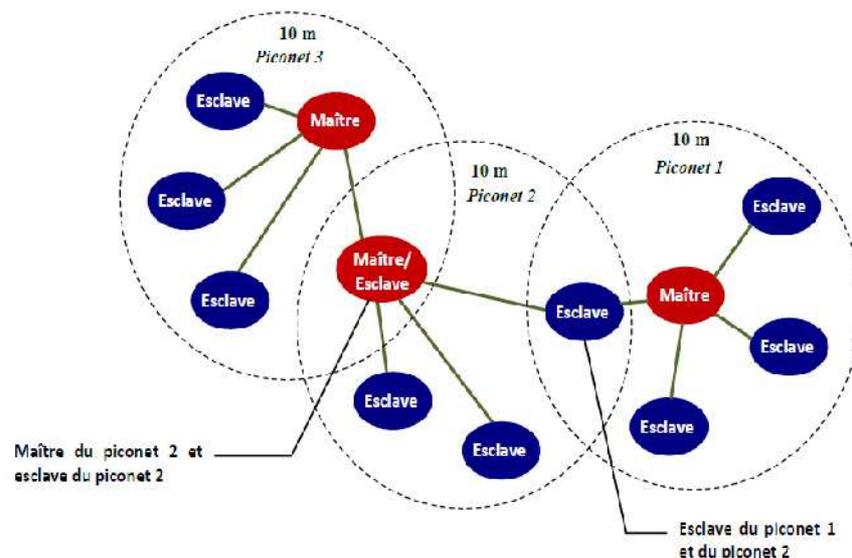


Figure.9. Exemple 2 de Réseau Bluetooth Scatternet

Différentes Versions du Bluetooth

- ⇒ La première version (*Bluetooth 1.0a*) de cette technologie radio est apparue en 1999 et disposait à l'époque d'une vitesse de transmission des données de 732,2 kbit/s ;
- ⇒ La version 1.0b, qui l'a suivie, a connu un certain nombre de défauts et de problèmes de sécurité ;
- ⇒ La version *Bluetooth 1.1* représente une version fiable pour les produits commercialisables ;
- ⇒ Aujourd'hui, il existe une multitude de versions *Bluetooth* basées les unes sur les autres ;
- ⇒ Elles se distinguent principalement par leur vitesse de transmission des données maximale ainsi que par leur fonctionnalité et leur domaine d'application ;
- ⇒ Le tableau 1, donne un historique des différentes versions du *Bluetooth*.

Tableau.1. Différentes versions de Bluetooth SIG

N° de la version	Date de parution	Débit max	Nouveautés et améliorations
Bluetooth 1.0a	Juillet 1999	732.2 Kbits/s	Première version officielle.
Bluetooth 1.0B	Décembre 1999	732.2 Kbits/s	Quelques améliorations générales.
Bluetooth 1.1	Février 2001	732.2 Kbits/s	Mesures RSSI (Received Signal Strength Indication - <u>Indication de la puissance du signal reçu</u>) ; Correction de problèmes de connexion et de sécurité ; première version pour produits commercialisables ; cryptage ; jusqu'à sept connexions simultanées.
Bluetooth 1.2	Novembre	1 Mbits/s	AFH (Adaptive Frequency Hopping) pour

	2003		réduire les interférences avec le Wi-Fi ; SCO améliorée (ESCO pour Enhanced SCO en anglais) pour l'amélioration de la qualité radio par la retransmission des paquets corrompus ; Rétrocompatibilité avec <i>Bluetooth</i> 1.1.
Bluetooth 2.0 + EDR	Novembre 2004	2.1 Mbits/s	EDR (Enhanced Data Rate) pour une transmission 3 à 10 fois plus rapide et réduction de la consommation ; Nouveaux types de paquets ; Complémentaire de la NFC (Near Field Communication : une technologie permettant d'échanger des données entre un lecteur et n'importe quel terminal mobile compatible ou entre les terminaux eux-mêmes) lors de l'appairage.
Bluetooth 2.1 + EDR	Aout 2007	2.1 Mbits/s	Connexion automatique sans code PIN grâce au SSP (Secure Simple Pairing : utilise un mécanisme beaucoup plus complexe, connu sous le nom de cryptographie à courbe elliptique pour l'authentification).
Bluetooth 3.0 + HS	Avril 2009	24 Mbits/s	Canal HS (highspeed : capacité de données haute vitesse) supplémentaire basé sur le Wi-Fi et l'UWB (Ultra Large Bande).
Bluetooth 4.0 LE (Ou : Bluetooth smart)	Décembre 2009	24 Mbits/s	Pile de protocoles LE (Low Energy : permettre aux dispositifs sans fil à courte portée de fonctionner pendant des mois voire des années à partir d'une simple pile) pour différentes procédures → Basse consommation pour les petits appareils ; Exemple : capteurs sans fil envoyant de faibles volumes de données à intervalles occasionnels ; Les connexions peuvent être établies rapidement et interrompues dès que le transfert de données est terminé, réduisant ainsi la consommation énergétique ; Amélioration de la correction des erreurs ; Cryptage 128 bits.
Bluetooth 4.1	Décembre 2013	25 Mbits/s	Bluetooth 4.1 comprend plusieurs améliorations supplémentaires. Celles-ci concernent principalement la qualité de connexion ; Par la proximité des fréquences de Bluetooth et de la technologie LTE (4G), de nombreuses interférences entre

			les deux dérangeaient les transmissions par le passé. Par le nouveau procédé AFH, Bluetooth 4.1 recherche automatiquement un nouveau canal lorsque des interférences sont détectées.
Bluetooth 4.2	Décembre 2014	25 Mbits/s	Quelques améliorations générales ; Plus rapide, plus sécurisé et moins gourmand en énergie
Bluetooth 5	Décembre 2016	50 Mbits/s	Nette augmentation de la portée et du débit.
Bluetooth 5.1	Décembre 2019		Axé sur la localisation et permettant aux appareils de déterminer l'emplacement exact des autres appareils connectés à quelques centimètres près, a constitué une avancée majeure. Vous serez également en mesure de déterminer la direction d'où provient un signal.
Bluetooth 5.2	2020	50 Mbits/s	LEPC (LE Power Control) - Une fonction qui permet à l'émetteur d'ajuster sa puissance de transmission par lui-même ou suite à la demande d'un appareil pair ; EATT (Enhanced Attribute Protocol) - Une version améliorée du protocole d'attribut original (ATT) qui permet des transactions simultanées ou parallèles entre un client Bluetooth LE et un serveur (par opposition à ATT) qui n'autorisait que les transactions séquentielles. Améliore l'efficacité énergétique et la qualité du son dans tous les appareils connectés utilisés pour des tâches audios. Le Low Complexity Communication Codec (LC3) est un nouveau codec qui permet le transfert audio simultané vers plusieurs appareils et peut compresser et décompresser plus efficacement les données transportées. L'ajout de nouvelles fonctionnalités pour les applications IoT (Internet of Things).
Bluetooth 5.3	Mai 2022 (Annoncée en juillet 2021)	50 Mbits/s	Offre une consommation plus faible lors de l'utilisation, des connexions avec moins d'interférences, une plus grande sécurité de connexion et une meilleure qualité en permanence.
Bluetooth 5.4	2023	50 Mbits/s	Il présente des fonctionnalités qui semblent principalement intéressantes pour les réseaux Bluetooth à grande échelle avec prise en charge de la communication bidirectionnelle avec des milliers de nœuds finaux à partir d'un

Protocoles Bluetooth

- ⇒ Comme tout réseau, la technologie *Bluetooth* peut être décrite avec une notion de couches différente du modèle OSI ;
- ⇒ La figure (10) fournit une comparaison entre les couches de la technologie *Bluetooth* et les couches du modèle OSI de référence. Cette comparaison permet de mettre en évidence la division des tâches et des responsabilités entre les différentes couches de la pile *Bluetooth*.

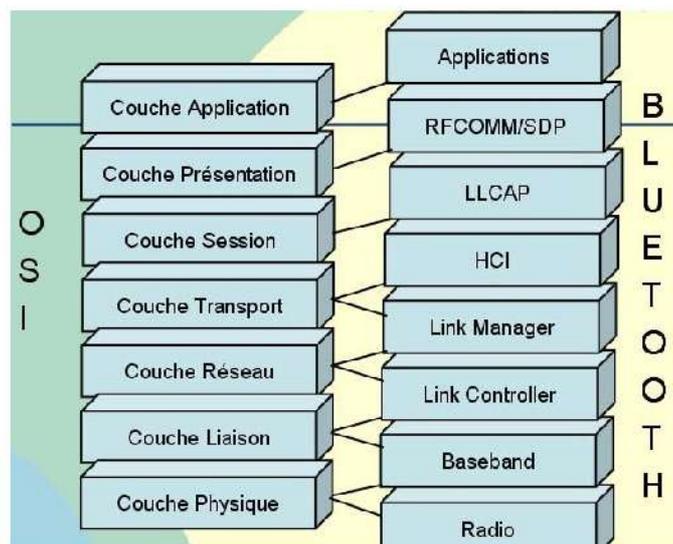


Figure. 10. Le modèle OSI de référence et Bluetooth

- ⇒ On parle alors de piles de protocoles (Pile : implique que chaque couche de protocole s'appuie sur celles qui sont en dessous afin d'y apporter un supplément de fonctionnalité).

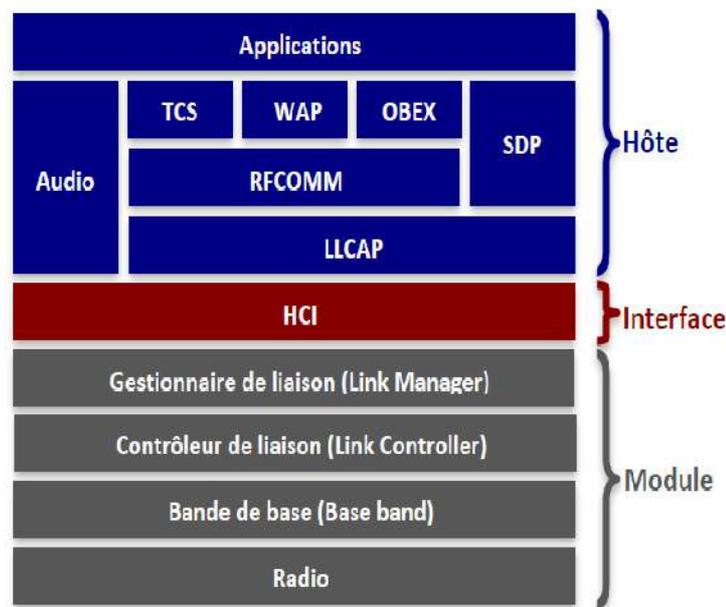


Figure. 11. La pile de protocole Bluetooth

- ⇒ Comme le montre la figure (11), on peut séparer la pile de protocoles en deux couches. La 1^{ère} est une couche applicative (appelée hôte) et la 2^{ème} est une couche physique (appelée module) ;
- ⇒ C'est le HCI (Host Interface Controller) qui fera le lien entre le matériel et le logiciel ;
- ⇒ Dans ce qui suit, seront détaillés les éléments de ces deux couches.

Description des différentes couches

Les éléments fondamentaux d'un produit *Bluetooth* sont définis dans les deux premières couches, la couche radio et la couche Bande de Base. Ces dernières prennent en charge les tâches matérielles comme le contrôle du saut de fréquence (Communication) et la synchronisation des horloges.

a) La couche Radio Fréquence (RF) - Couche Physique

- ⇒ La couche radio (la couche la plus basse) est gérée au niveau matériel ;
- ⇒ C'est elle qui s'occupe de l'émission et de la réception des ondes radios ;
- ⇒ Elle définit les caractéristiques telles que :
 - La bande de fréquence ;
 - L'arrangement des canaux (fréquences) ;
 - Les caractéristiques de l'émetteur ;
 - Les modulations utilisées ;
 - Les caractéristiques du récepteur.
- ⇒ Le Bluetooth utilise la bande ISM (disponible au niveau mondial et s'étend sur 83,5 MHz « de 2,4 à 2,4835 GHz ») sans licence dans la plupart des pays
- ⇒ Bluetooth doit donc faire face aux interférences suivantes :

- D'autres techniques spécifiques de radiofréquence à courte portée (c'est-à-dire les systèmes de sécurité des voitures et les téléphones sans fil) qui utilisent le spectre 2,4 GHz ;
- Les réseaux locaux sans fil (par exemple l'IEEE 802.11) ;
- Les générateurs de bruit aléatoire (par exemple, fours à micro-ondes) ;
- Autres unités Bluetooth.

Techniques de communication

- ⇒ Afin de transmettre et de recevoir dans la bande ISM, éventuellement bruitée, le *Bluetooth* utilise plusieurs techniques (Technique de saut de fréquence, technique de contrôle de puissance adaptative et paquets de données courts) pour minimiser l'effet de pertes de paquets ;
- ⇒ Le *Bluetooth* utilise un schéma FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) qui divise la bande ISM en 79 canaux de 1 MHz chacun (la version 1.0 du *Bluetooth*) ;
- ⇒ Comme le montre le tableau 1, la version 1.2 du SIG *Bluetooth* introduit la technique AFH ;
- ⇒ L'AFH n'utilise qu'un sous-ensemble de N fréquences (minimum 20) parmi les 79 fréquences définies sur la bande. C'est le maître qui décide quelles sont les fréquences à utiliser, en fonction des informations dont il dispose sur l'occupation des canaux. Cela permet, par exemple, d'éviter des fréquences qui sont très utilisées par un autre système.
- ⇒ Afin de se conformer aux réglementations hors bande de chaque pays, dans les deux systèmes, une bande de garde est utilisée aux bords inférieur et supérieur de la bande ;
- ⇒ La communication entre les appareils bascule entre les canaux disponibles afin que les interférences avec d'autres appareils *Bluetooth* et non-*Bluetooth* soient réduites au minimum (Voire la figure 12) ;

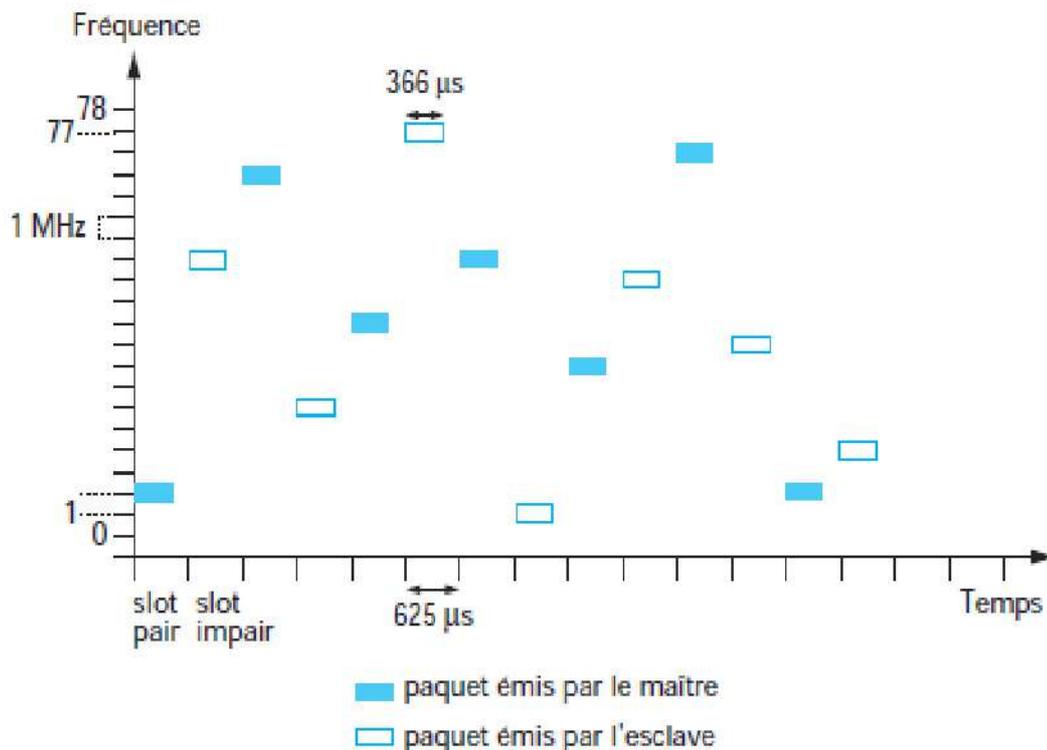


Figure.12. Technique de communication FHSS

- ⇒ Bien que le *Bluetooth* assure la retransmission des paquets perdus, la source d'interférence sera très probablement présente à la même fréquence sur le prochain slot de temps. Par conséquent, la transmission de paquets perdus sur une fréquence différente aura donc plus de chance de réussir ;
- ⇒ Comme le montre la figure (12), la période (la durée d'un Time-Slot) est de 625µs ce qui permet 1600 sauts par seconde ;
- ⇒ Dans la technique FHSS, le codage de l'information se fait par sauts de fréquence ;
- ⇒ Le principe de la technique FHSS est la commutation rapide entre plusieurs canaux de fréquence en utilisant des codes pseudo-aléatoires ;

Exemple de code pseudo-aléatoire de taille 15 valeurs :

$randperm(15) = [12, 2, 14, 15, 10, 13, 8, 9, 1, 5, 11, 7, 6, 3, 4]$.

- ⇒ Ces codes sont connus par l'émetteur et le récepteur pour la synchronisation (Maître et esclave) ;
- ⇒ La probabilité pour que 2 piconets se retrouvent sur la même fréquence (collision) reste faible ;
- ⇒ Les signaux perturbateurs, occupant une bande spectrale limitée, ne perturberont donc la liaison que de temps en temps et pour une durée limitée à un time-slot soit 625 µs ;
- ⇒ Deux types de liaisons de données sont définis par les couches de liaison *Bluetooth* ;

Liaison Synchrone (ou SCO = Synchronous Connection-Oriented link) - Pour une liaison vocale :

- Le lien SCO est un lien point-à-point entre le maître et un esclave ;
- Les liaisons SCO utilisent des créneaux réservés par le maître et sont donc adaptés aux services comme la transmission de la voix ;
- C'est une commutation par circuit ;
- Il peut y avoir jusqu'à trois liens SCO par piconet. Le maître réserve à des instants périodiques (tous les 2, 4 ou 6 slots), deux slots (un dans chaque sens) qui sont consacrés aux flux SCO ;
- Les données envoyées via une liaison SCO ne sont jamais retransmises, car les liaisons SCO sont utilisées par l'audio là où la retransmission n'est d'aucune utilité.

Liaison Asynchrone (ou ACL = Asynchronous Connection-Less link) - pour une liaison informatique :

- Dans les slots non réservés aux paquets SCO, le maître peut librement échanger des paquets ACL avec ses esclaves ;
- C'est une commutation par paquet ;
- Les liens ACL sont utilisés pour transférer des données utilisateur et des données de contrôle et incluent généralement un contrôle de redondance cyclique (CRC - un outil logiciel permettant de détecter des erreurs de transmission ou de transfert par ajout, combinaison et comparaison de données redondantes) → Retransmission du paquet en cas de problème ;
- La vitesse maximale de transmission des données est de 432 Kbits/s en mode symétrique. Elle est égale à 721.57 Kbits/s en mode asymétrique ;
- La limitation des interférences (collisions) car les fréquences ne sont plus polluées (Voir le problème de collision dans la figure 12) ;
- Le lien ACL est un lien point-à-multipoint entre le maître et l'ensemble des esclaves. Il n'en existe qu'un par piconet ;
- Le maître attribue les slots afin de satisfaire au mieux les besoins des différents esclaves.

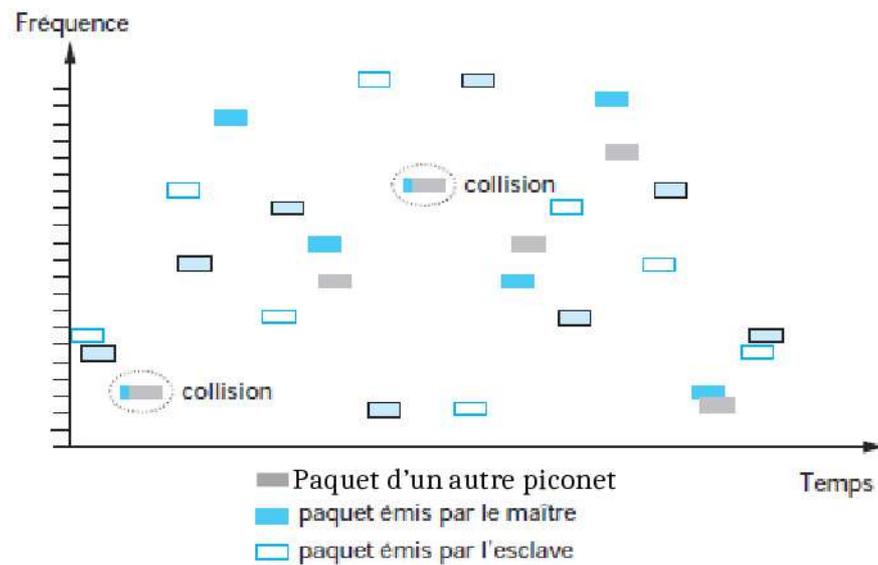


Figure. 13. Possibilités de collisions entre piconets

Puissance dans le Bluetooth

- ⇒ La portée d'une liaison RF (à 2,45 GHz) dépend de la puissance d'émission, de la qualité de l'antenne (forcément limitée par les dimensions des systèmes hôtes) et de l'environnement (obstacles, interférences...);
- ⇒ La puissance d'émission permise, pour un équipement *Bluetooth*, est réglementée. Trois classes de puissance sont définies par la norme mais seules les classes 1 et 3 sont couramment utilisées.

Tableau.2. Différentes classes de puissance

Classe	Puissance d'émission maximale	Portée de champ libre
1	100 mW	100 m
2	2.5 mW	40 m
3	1 mW	10 m

- ⇒ La plupart des produits *Bluetooth* sont des modules de la classe 3 ;
- ⇒ À l'intérieur, la puissance d'émission dans la bande de fréquences de 2,4 GHz reste limitée à 100 mW ;
- ⇒ A l'extérieur, l'usage de 100 mW est autorisé entre 2,4 et 2,454 GHz et réduit à 10 mW entre 2,454 et 2,483 5 GHz, afin d'éviter les risques de brouillage avec les appareils de communication militaires ;
- ⇒ Le contrôle de la puissance est obligatoire pour les équipements de classe 1 et optionnel pour les autres classes ;
- ⇒ L'intérêt de contrôler la puissance d'émission est double : réduire l'interférence sur les autres utilisateurs du réseau et réduire la consommation d'énergie ;

- ⇒ Avec le contrôle de puissance, deux appareils en communication mesurent l'indication de l'intensité du signal reçu RSSI et demandent à l'autre appareil de diminuer/augmenter la puissance de sortie en fonction de cela ;
- ⇒ L'optimisation de la puissance de sortie, dans une liaison, est réalisée avec des commandes LMP (voir Link Manager Protocol) ;
- ⇒ Le niveau de sensibilité du récepteur est défini pour un taux d'erreur bit (BER : Bit Error Rate) de 0,1 % ;
- ⇒ La norme impose une sensibilité au moins égale à -70 dBm. Dans un milieu avec des obstacles, la portée maximale pour cette sensibilité et une puissance de 100 mW, est d'environ 100 m.

Modulation dans le Bluetooth

- ⇒ Le module radio *Bluetooth* utilise la modulation GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) ;
- ⇒ C'est une modulation de fréquences de type FSK à deux états (Voir figure 14), dont le signal modulant est filtré par un filtre gaussien (Voir la figure 15) ;

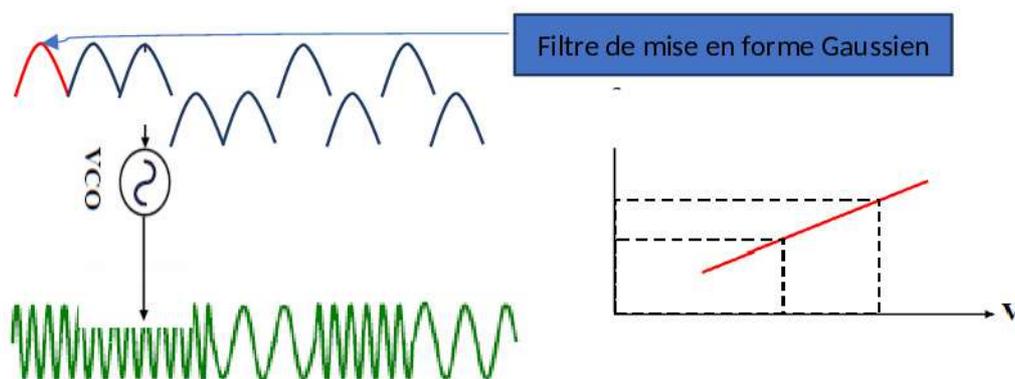


Figure. 14. Modulateur MDF binaire à phase continue

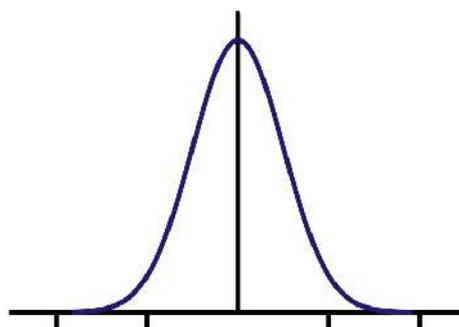


Figure. 15. Filtre Gaussien

- ⇒ Les données sont transmises sur une fréquence centrale F_c . La modulation FSK fait correspondre à un élément binaire de valeur 1, une déviation de fréquence positive (transmission sur la fréquence $F_c + \Delta f$), et à un élément binaire de valeur 0, une déviation négative (transmission sur la fréquence $F_c - \Delta f$);
- ⇒ L'indice de modulation ($2 \times \Delta f / D$ où D est le débit) est compris entre 0,28 et 0,35, ce qui correspond à $140 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 175 \text{ kHz}$;
- ⇒ Dans ce type de modulation, le BT est réglé sur 0,5 (Voir le spectre dans la figure 16). Le BT est le produit entre la bande passante B (bande passante à -3 dB - demi-puissance de l'impulsion/filtre) et le temps du symbole T ;
- ⇒ Pour différentes applications, nous trouverons différentes valeurs de BT qui sont recommandées.

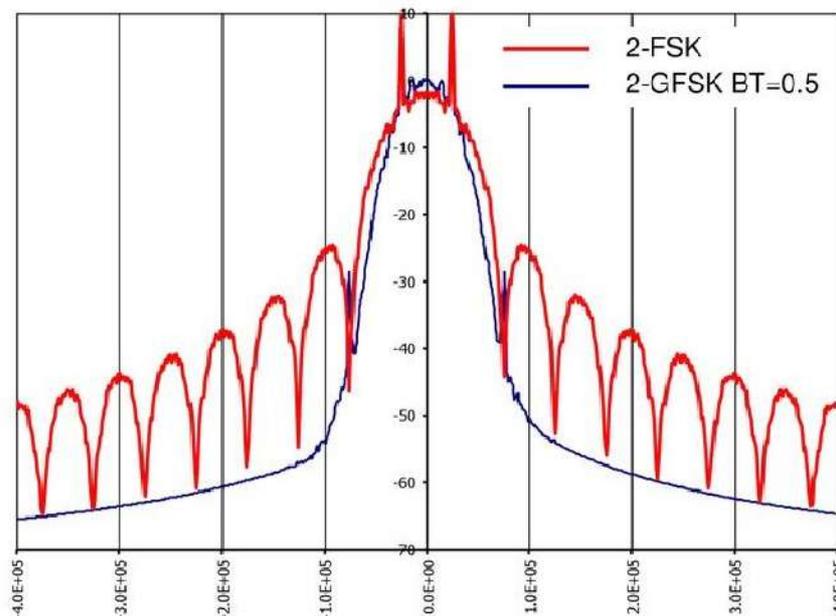


Figure.16. Spectre d'une modulation GFSK

Synchronisation Emetteur / Récepteur

- ⇒ Le type de liaison radio utilisée dans les appareils *Bluetooth* est appelée liaison semi-duplex;
- ⇒ Cela signifie que deux appareils peuvent communiquer entre eux dans chaque direction, mais pas simultanément;
- ⇒ Le 1^{er} transmet tandis que l'autre reçoit, puis l'autre transmet tandis que le premier reçoit;
- ⇒ Un appareil de ce type peut être, à tout moment, dans l'un des trois états soit en émission sur un canal radio donné, en écoute sur un canal particulier ou en veille.

Force du signal et sensibilité du récepteur

- ⇒ L'intensité du signal, mesurée par un appareil récepteur, est appelée indicateur d'intensité du signal reçu (RSSI) ;
- ⇒ La force du signal peut avoir un impact sur la fiabilité de plusieurs façons. D'une part, un signal fort peut saturer un récepteur radio et des erreurs peuvent se produire lors de la tentative de décodage du signal reçu. D'autre part, plus un signal est faible, plus son niveau se rapproche du niveau du bruit. Le bruit dans ce contexte caractérise tout signal radio indésirable ;
- ⇒ Lorsque le rapport SNR diminue, il devient difficile de décoder, sans erreurs, les informations contenues dans le signal transmis → augmentation du BER ;
- ⇒ Lorsque le BER est suffisamment élevé, la communication échoue complètement ;
- ⇒ Plus un récepteur est éloigné de l'émetteur, plus le RSSI sera bas et donc le potentiel d'erreurs sera plus élevé, en raison d'un rapport SNR plus faible ;
- ⇒ Deux appareils, A et B, peuvent avoir des niveaux de puissance de transmission différents. Cela peut conduire à des situations où l'appareil A est confortablement à portée de l'appareil B et peut donc lui transmettre des données de manière fiable, mais B approche de sa limite de sensibilité et, par conséquent, le rapport SNR rencontré par A est faible et provoque des erreurs de transmission.

Principe de communication des informations au sein du réseau Bluetooth

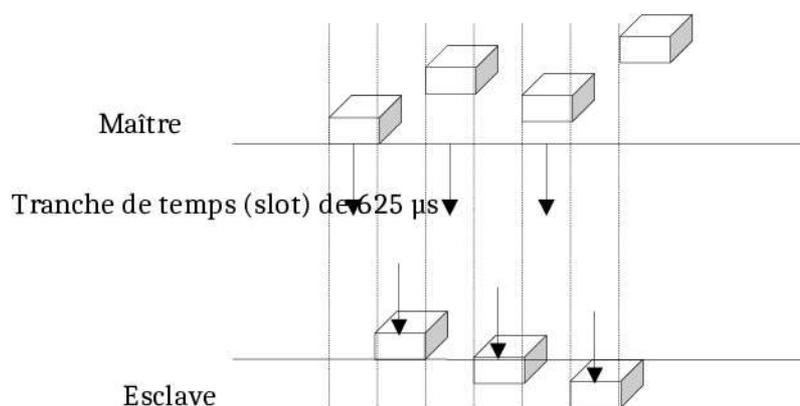


Figure.17. Principe de communication au sein du réseau Bluetooth

- ⇒ Comme le montre la figure (17), un terminal (maître ou esclave) utilise une fréquence sur un slot puis, par un saut de fréquence (Frequency

- Hopping), il change de fréquence sur la tranche de temps suivante, et ainsi de suite ;
- ⇒ Un utilisateur *Bluetooth* utilise de façon cyclique toutes les bandes de fréquences ;
 - ⇒ Les utilisateurs d'un même piconet possèdent la même suite de sauts de fréquence, et, lorsqu'un nouveau terminal veut se connecter, il doit commencer par reconnaître l'ensemble des sauts de fréquences pour pouvoir les respecter ;
 - ⇒ Une communication s'exerce par paquet ;
 - ⇒ En général, un paquet tient sur un slot, mais il peut s'étendre sur 3 ou 5 slots comme le montre la figure (18) ;
 - ⇒ Le saut de fréquence a lieu à la fin de la communication d'un paquet ;

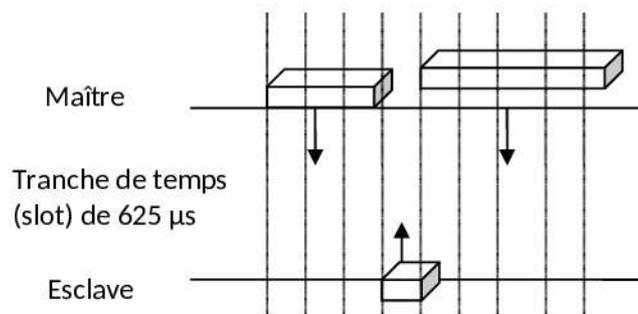


Figure. 18. Un paquet prenant plus d'un Time-slot

- ⇒ Lorsqu'un paquet a une taille de 1 slot on parle de transmission/réception Single slot ;
- ⇒ Lorsqu'un paquet possède une taille supérieure à 1 time slot (3 ou 5 slots), on parle de de transmission/réception Multi-slots ;
- ⇒ Comme le montre la figure 19, le saut de fréquence appliqué au paquet est celui du premier slot correspondant à ce paquet ;
- ⇒ Bluetooth peut donc utiliser 3 types de paquets :
 - des paquets de données courts : 1 time-slot, 240 bits au maximum ;
 - des paquets de données moyens : 3 time-slot, 1480 bits au maximum ;
 - des paquets de données longs : 5 time-slot, 2745 bits au maximum.
- ⇒ Le débit peut donc varier selon les types paquets utilisés dans un sens puis dans l'autre.

Exemple :

En fonction de la taille des paquets utilisés, le débit peut varier dans une large mesure.

- Paquet long dans un sens, court dans l'autre :

- $D1 = 2745 \text{ bits}/6 \times 625 \mu\text{s} = 732 \text{ kbits/s}$;
 $D2 = 240 \text{ bits}/6 \times 625 \mu\text{s} = 64 \text{ kbits/s}$;
- Paquet moyen dans un sens, court dans l'autre :
 $D1 = 1480 \text{ bits}/4 \times 625 \mu\text{s} = 592 \text{ kbits/s}$;
 $D2 = 240 \text{ bits}/4 \times 625 \mu\text{s} = 96 \text{ kbits/s}$;
 - Paquet long dans les deux sens :
 $D1 = 2745 \text{ bits}/10 \times 625 \mu\text{s} = 439,2 \text{ kbits/s} = D2$.

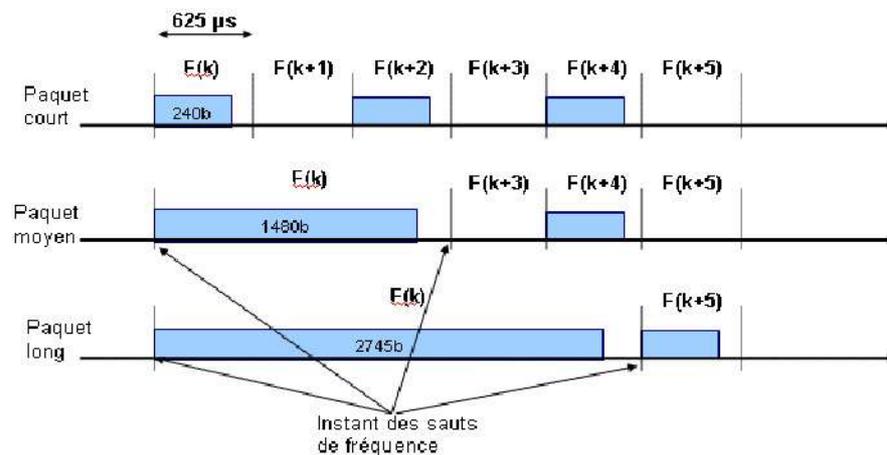


Figure.19. Saut de fréquence appliqué au paquet.

b) La couche bande de base (baseband)

- ⇒ Cette couche est également gérée au niveau matériel ;
- ⇒ Elle se trouve au-dessus de la couche radio dans la pile *Bluetooth* ;
- ⇒ Elle est responsable du codage/décodage du canal, de la correction d'erreurs, du blanchiment des données, de la sélection de sauts, de la sécurité *Bluetooth*, de la synchronisation et de la gestion d'une liaison *Bluetooth* pour la durée d'un paquet ;
- ⇒ C'est au niveau de la bande de base que sont définies les adresses matérielles des périphériques (équivalentes à l'adresse MAC d'une carte réseau) ;
- ⇒ Cette adresse, nommée BD_ADDR (*Bluetooth Device Address*), est codée sur 48 bits ;
- ⇒ Ces adresses sont gérées par l'IRA (IEEE Registration Authority) ;
- ⇒ C'est également la bande de base qui gère les différents types de communication entre les appareils (synchrones ou asynchrones) ;
- ⇒ La bande de base gère également les paquets et effectue la recherche de personne et l'interrogation pour accéder et interroger les appareils *Bluetooth* dans la zone ;
- ⇒ L'émetteur-récepteur en bande de base applique un schéma de duplexage TDD. C'est à dire que les unités Maître et Esclaves transmettent alternativement (une unité Maître transmet dans les slots pairs et les unités Esclaves dans les slots impairs comme le montre la figure 19) ;
- ⇒ Chaque slot, pour une communication maître esclave, est systématiquement suivie par un slot esclave maître ;

- ⇒ Un esclave est uniquement autorisé à émettre dans un slot donné si le maître l'a adressé dans le slot précédent ;
- ⇒ Toute communication directe entre esclaves est impossible, ils doivent passer par le maître du piconet. Le maître gère l'ordonnancement des esclaves selon l'algorithme Round Robin (tourniquet en français) (Un algorithme de planification à tour de rôle appelé aussi Roll-Call Polling – Voir figure 21).

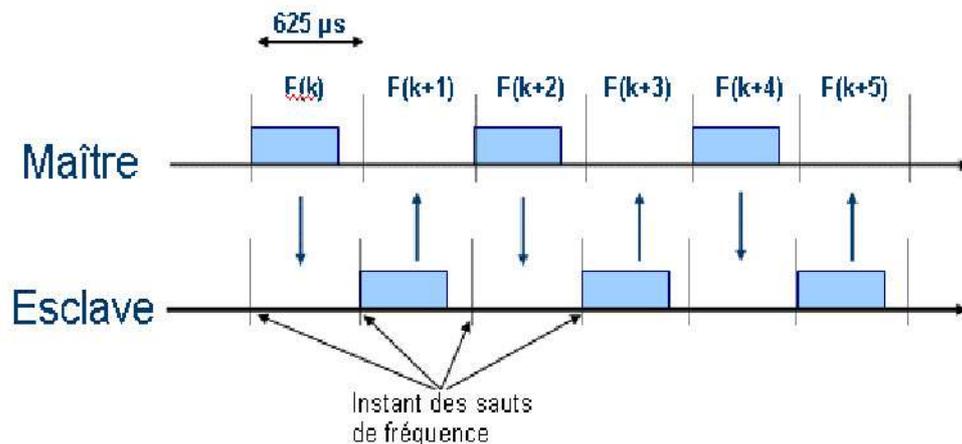


Figure.20. Une unité Maître transmet dans les slots pairs et les unités Esclaves dans les slots impairs

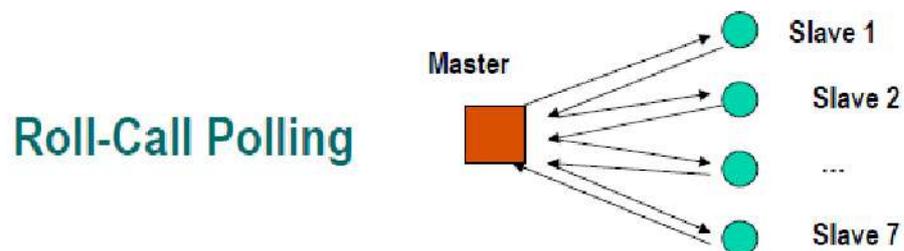


Figure.21. Algorithme Round Robin ou Roll-Call Polling