

# Technologie des réseaux sans-fil

Abdourakhmane Fall

UFR-SET Département Informatique

LGI3 2020



# Sommaire

- Généralité sur les réseaux sans-fil
- Modulation
- Déploiement sans fil
- Sécurité dans les réseaux sans fil

# Organisation

- Cours (60 %)
- TP/TD (40%)
- Examen final (50%), Devoir, Projet (50%)

# Généralité

# Sommaire

- Notions de base
- Historique
- Fréquences radio
- Catégories de réseaux sans fil
- La norme 802.11
- Rappel caractéristique de l'onde radio
- Composants d'un réseau sans fil
- Architecture d'un réseau sans-Fil

# Historique

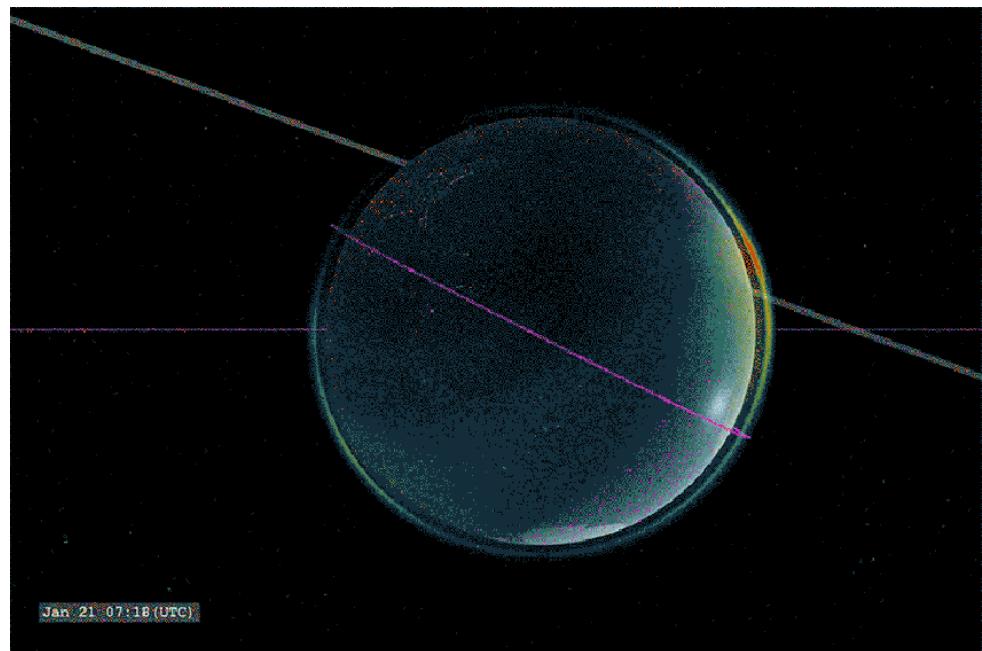
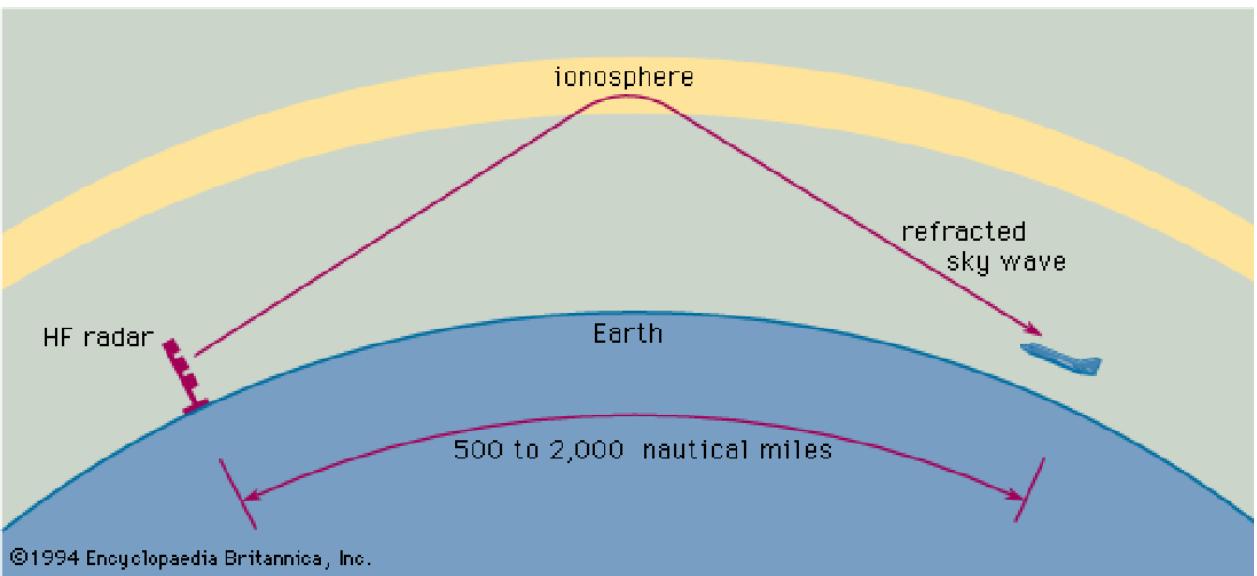
- 1838 : Théorie (S. Morse)
- 1858 : Câble transatlantique
- 1864 : Équations de Maxwell
- 1865 : Télégraphe (S. Morse)
- 1876 : Téléphone (Bell)
- 1898 : 1<sup>ère</sup> communication mobile (**Marconi Prix nobel 1909** , puis Armée US)

Maxwell's  
Equations

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \nabla \cdot D = \rho$$
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$
$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J$$

# Historique

- Cette expérience d'émission radio a permis de mettre en évidence les phénomènes de propagation à longue distance en basse et en moyenne fréquences par réflexion sur l'ionosphère



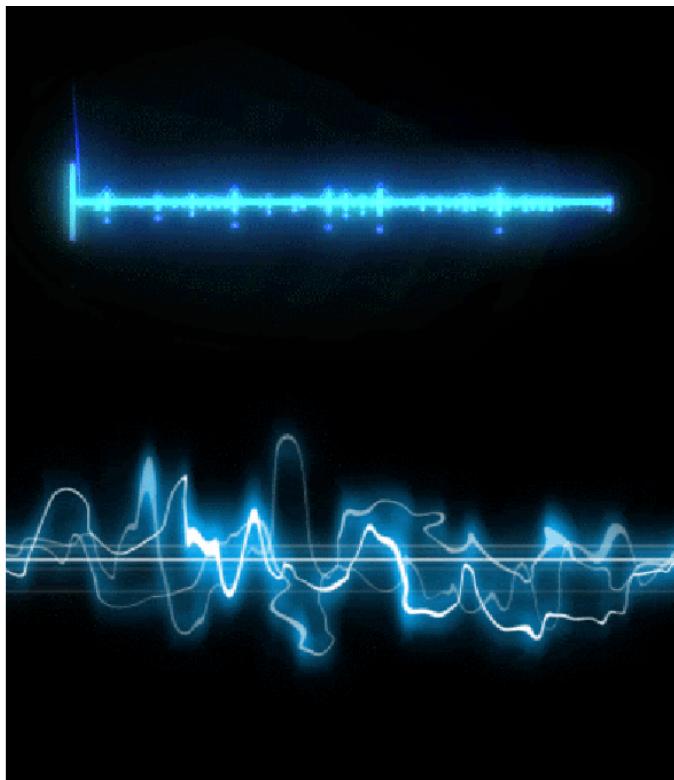
# Historique

- 1915 : 1<sup>ère</sup> liaison téléphonique transcontinentale (Bell System)
- 1930 : Télévision (principes)
- 1948: Invention du transistor, théorie de Shannon
- 1950 : nombreuses communications mobiles professionnelles
- 1958 : 1<sup>er</sup> réseau cellulaire public (Allemagne)

# Historique

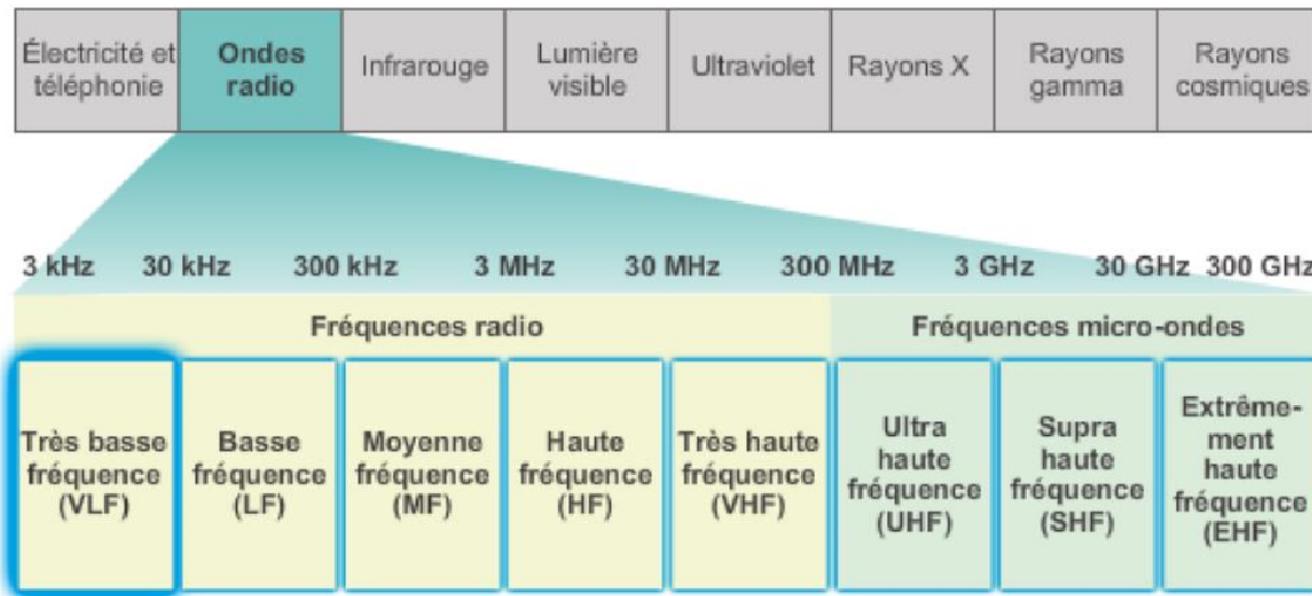
- 1962 : 1<sup>er</sup> satellite TV (Telsar I)
- 1962 : 1<sup>er</sup> satellite géostationnaire (Intelsat I)
- 1964 : Transmission de données sur RTC
- 1969 : Internet
- 1970 : Bell / 1G
- 1990 : IEEE 802.11 Wireless LAN

# Fréquence Radio



# Fréquence Radio

Ondes radio du spectre électromagnétique

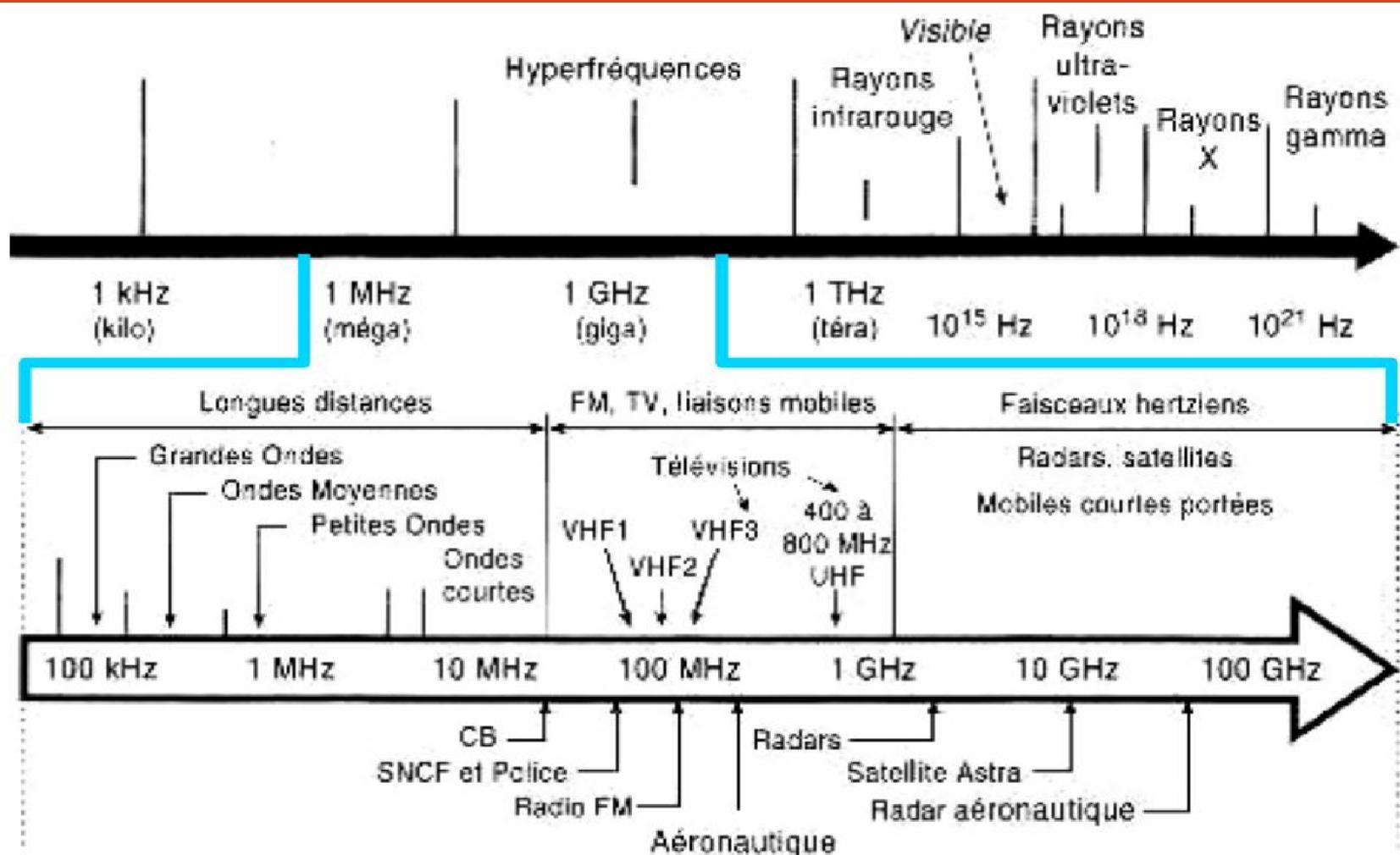


Communication sans fil sur VLF (très basse fréquence)



- Navigation radio
- Communication sous-marine
- Moniteurs sans fil de fréquence cardiaque

# Fréquence Radio



# Fréquence Radio

Fréquence	Longueur d'onde	Désignation	Utilisation
3 Hz à 30 Hz	100 000 km à 10 000 km	ELF ( extremely low frequency)	Détection de phénomènes naturels
30 Hz à 300 Hz	10 000 km à 1 000 km	SLF ( super low frequency)	Communication avec les sous marins
300 Hz à 3 KHz	1 000 km à 100 km	ULF ( ultra low frequency)	Détection de phénomènes naturels
3 KHz à 30 KHz	100 km à 10 km	VLF ( very low frequency)	Communication avec les sous marins, implants médicaux,..
30 KHz à 300 KHz	10 km à 1 km	LF (low frequency)	Radionavigation, radiodiffusion
300 KHz à 3 MHz	1 km à 100 m	MF (medium frequency)	Radio AM, service maritime
3 MHz à 30 MHz	100 m à 10 m	HF (high frequency)	Militaire, radiodiffusion, Maritime, Météo
30 MHz à 300 MHz	10 m à 1 m	VHF (very high frequency)	Radio FM, Gendarmerie, Pompiers Météo,..
300 MHz à 3 GHz	1 m à 10 cm	UHF (Ultra high frequency)	Réseaux privés, militaire, GSM, <b>WiFi</b> , Télévision
3 GHz à 30 GHz	10 cm à 1 cm	SHF (Super high frequency)	Réseaux privés, Micro-onde, <b>WiFi</b> , Radiodiffusion satellite, faisceau hertzien, radar météo
30 GHz à 300 GHz	1 cm à 1 mm	EHF (Extremly high frequency)	Réseaux privés, Radar anticollision voiture, liaisons vidéo transportables
300 GHz à 3000 GHz	1 mm à 1 µm	TéraHertz	

# Fréquence Radio

- [www.afnr.fr](http://www.afnr.fr): Bandes de fréquences : attribuées aux différents services de radiocommunication par le Règlement des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications, élaboré par les conférences mondiales des radiocommunications
- En France, les bandes ainsi attribuées sont réparties entre 9 affectataires (7 administrations et 2 autorités indépendantes)
  - CSA: Conseil supérieur de l'audiovisuel
  - ART Autorité de régulation des Télécommunications
- Sénégal: ARTP

# Fréquence Radio

□ <https://www.artpsenegal.net/>

The screenshot shows the homepage of the Autorité de Régulation des Télécommunications et des Postes (ARTP) website. The header features the ARTP logo, a search bar, and a phone number (800 800 200). The main menu includes links to Accueil, L'ARTP, Activités de régulation, Observatoire, Publications, Activités à l'international, and Procédures et Formulaires. A sidebar titled 'Accès rapides' lists various services like Espace Consommateur, Espace Professionnel, and Rapports annuels. The main content area features a large image of several tall radio towers against a blue sky. Below the image, there are sections for Actualités (with a thumbnail of a meeting), Observatoire (with icons for telephone, mobile, internet, newsletter, and service quality), Grands dossiers (with a thumbnail of a document), and E-Services (with a thumbnail of a document). At the bottom, there are links for 'Télécharger la newsletter' and 'Mon adresse email'.

# Fréquence Radio

[https://artpsenechal.net/anciensite/images/documents/document\\_TANAF\\_111.pdf](https://artpsenechal.net/anciensite/images/documents/document_TANAF_111.pdf)

Consulter le fichier!!!!!!! 



REPUBLIQUE DU SENEGAL  
**AGENCE DE REGULATION DES TELECOMMUNICATIONS**  
**ET DES POSTES**

**TABLEAU NATIONAL  
D'ATTRIBUTION DES  
FREQUENCES**

# Catégorie des Réseaux sans-Fil

- Classes de réseaux sans fils - selon l'étendue
- **WBAN: Wireless Body Area Network**
- **WPAN: Wireless Personal Area Network**
- **WLAN: Wireless Local Area Network**
- **WMAN : Wireless Metropolitan Area Network**
- **WRAN: Wireless Regional Area Network**
- **WWAN: Wireless Wide Area Network**

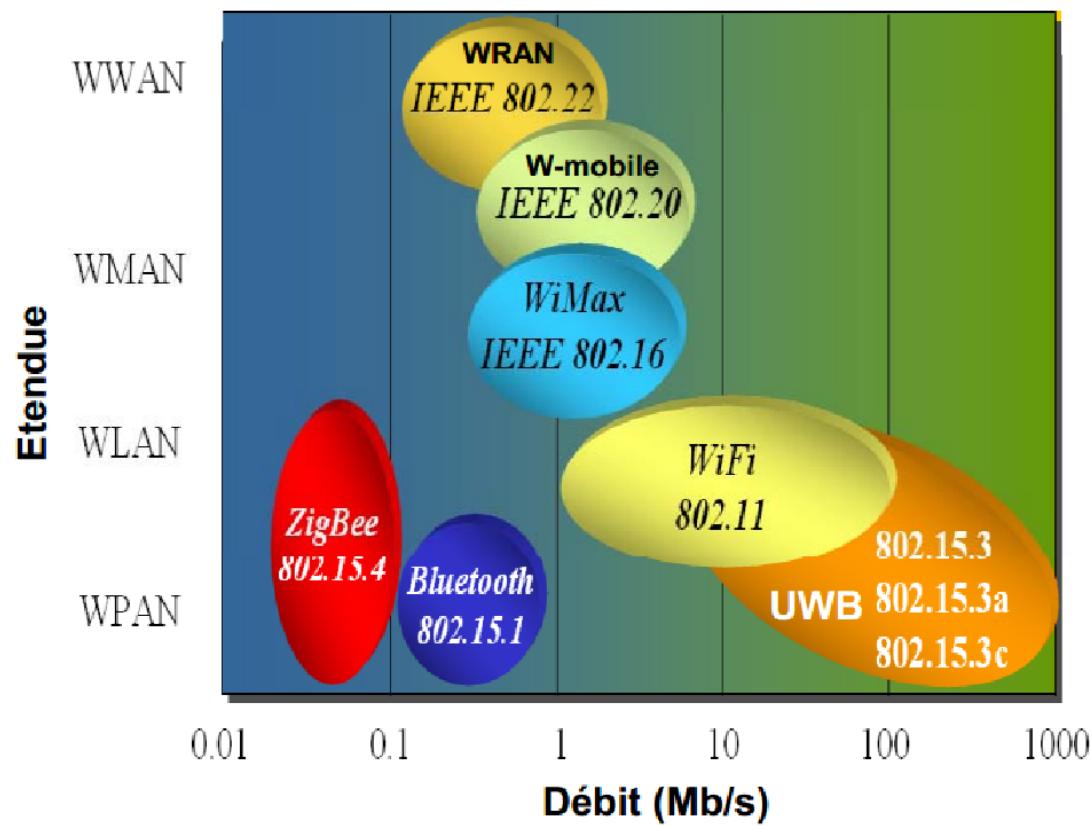
# Catégorie des Réseaux sans-Fil

## □ Classes de réseaux sans fils - selon l'étendue

- **WPAN** : IEEE 802.15 et WiMedia
  - ➡ IEEE 802.15.1 - **Bluetooth**
  - ➡ IEEE 802.15.3 – **UWB (Ultra WideBand)**
  - ➡ IEEE 802.15.4 – **ZigBee**
- **WLAN** : IEEE 802.11 et **WiFi**
  - ➡ IEEE 802.11b, a, g
  - ➡ IEEE 802.11s, i, f
  - ➡ **IEEE 802.11e (qualité de service)**
  - ➡ **IEEE 802.11n (190 Mb/s + intégration de 11e, 11f et 11i)**
- **WMAN** : IEEE 802.16 et **WiMax**
  - ➡ IEEE 802.16-2004
  - ➡ IEEE 802.16e/IEEE 802.20 (**Wi-Mobile**)
- **WRAN** : IEEE 802.22 et **WiRAN**
  - ➡ Utilisation de la bande TV 54-698 MHz

# Catégorie des Réseaux sans-Fil

## □ Portées et débits des principales technologies sans fils



# Catégorie des Réseaux sans-Fil: ZigBee

□ Réseaux ZigBee - WiMedia (std IEEE 802.15.4)

□ Caractéristiques:

□ Faible débit (20 à 250 Kb/s)

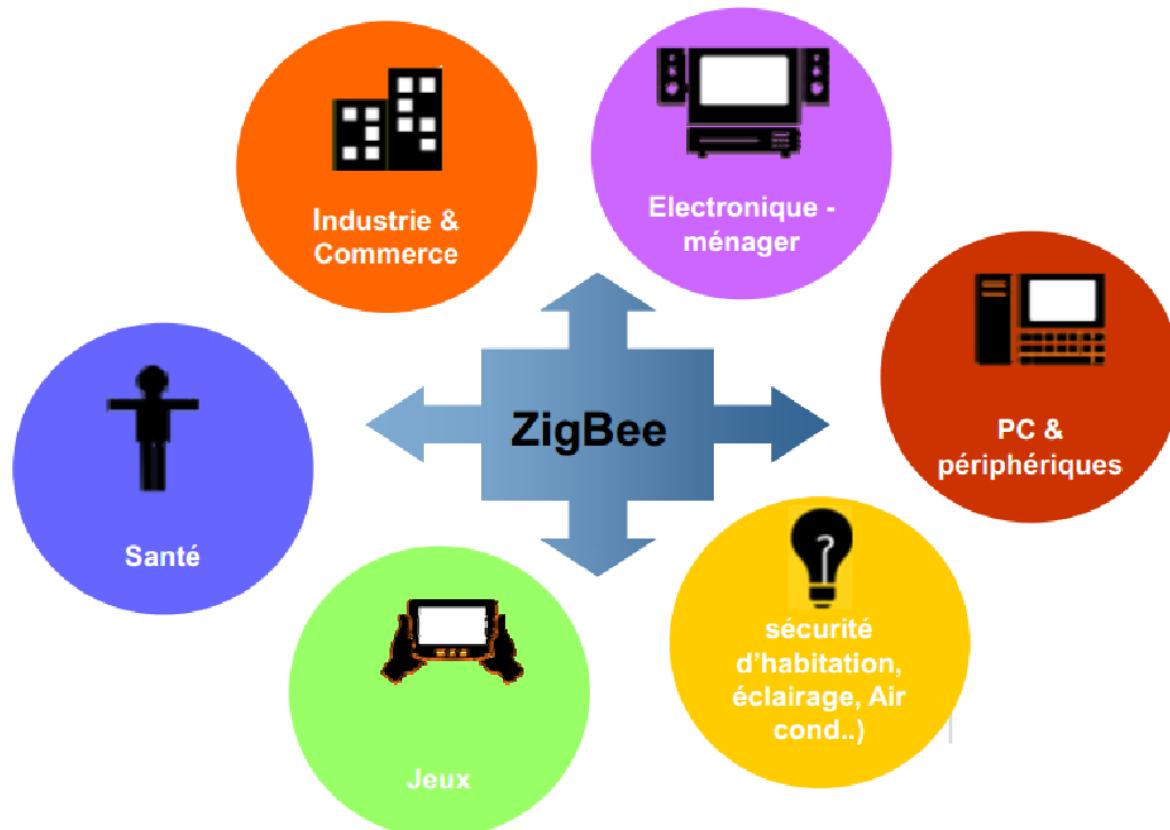
□ Faible distance

□ Faible consommation

□ Petits paquets de données

# Catégorie des Réseaux sans-Fil: ZigBee

## □ Réseaux ZigBee: Domaines d'applications



# Catégorie des Réseaux sans-Fil: ZigBee

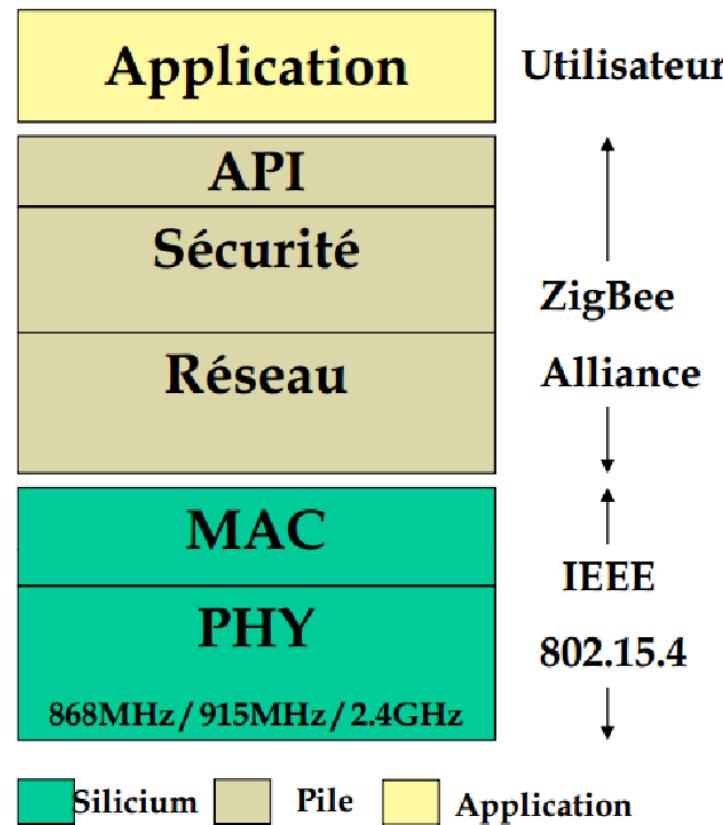
## □ Réseaux ZigBee - Exemple de réseau



□ L'ouverture de la porte déclenche plusieurs fonctions: éclairage, climatisation, four, TV, musique

# Catégorie des Réseaux sans-Fil: ZigBee

## □ Réseaux ZigBee - Architecture



# Catégorie des Réseaux sans-Fil: Bluetooth

## □ Réseaux Bluetooth (Std IEEE 802.15.1)

- Bluetooth fonctionne dans la bande (sans licence) centrée sur 2.45GHz avec des canaux RF :  $2420+k$  MHz,  $k=0..78$ .
- Distance maxi entre nœuds : 10 m
- Débit : 720 kb/s
- Coût très bas (chip à ~\$5).
- Très faible consommation : 100 mW à 100 m et 1 mW à 1 m
- Flux ciblés : data, audio, graphiques, vidéo (!)
- Appareils ciblés : personnels (PC et périphériques, caméra, appareil photo...).



Clavier et souris  
Bluetooth



Oreillette  
Bluetooth



Adaptateur USB  
Bluetooth



Jouet  
Bluetooth



Lunettes  
Bluetooth



Montre  
Bluetooth

# Catégorie des Réseaux sans-Fil: Bluetooth

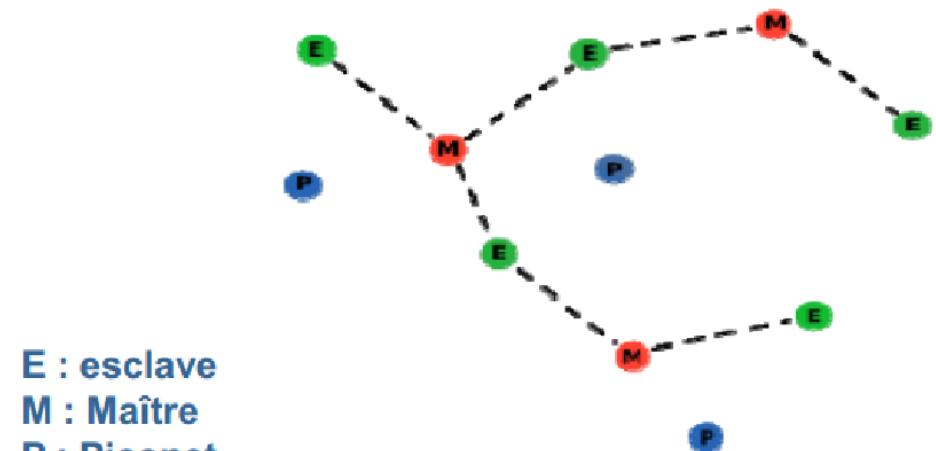
## □ Réseaux Bluetooth - Principe général:

□ Au Max 8 appareils peuvent former un **piconet**.

□ Au maximum 10 piconets dans la même zone de couverture.

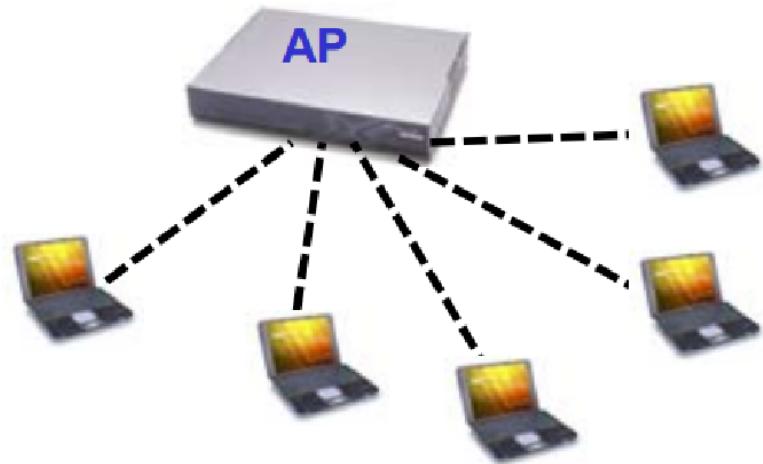
□ Chaque piconet est composé d'un maître et d'esclaves.

□ Le maître orchestre les transmissions des esclaves.

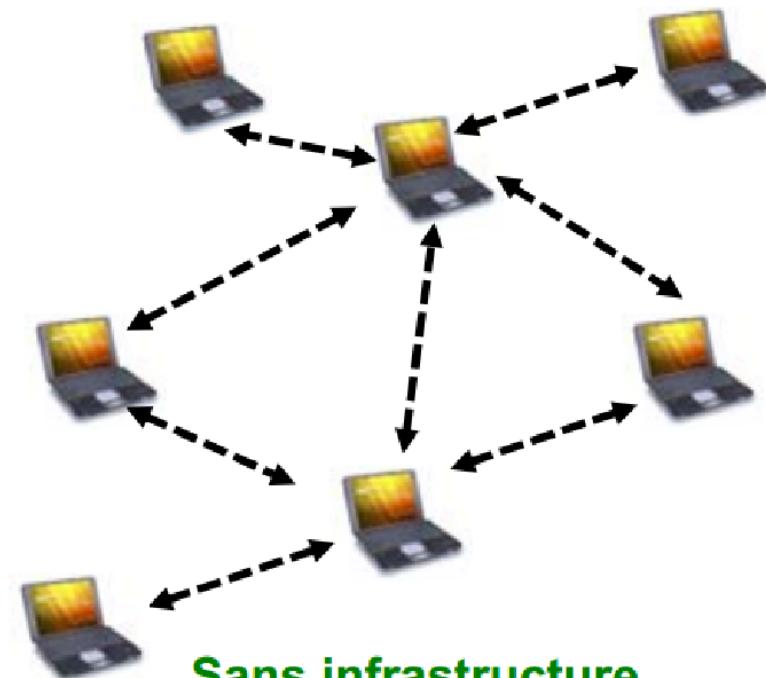


# Catégorie des Réseaux sans-Fil: WIFI

## □ Réseaux WIFI (WIreless FIdelity)



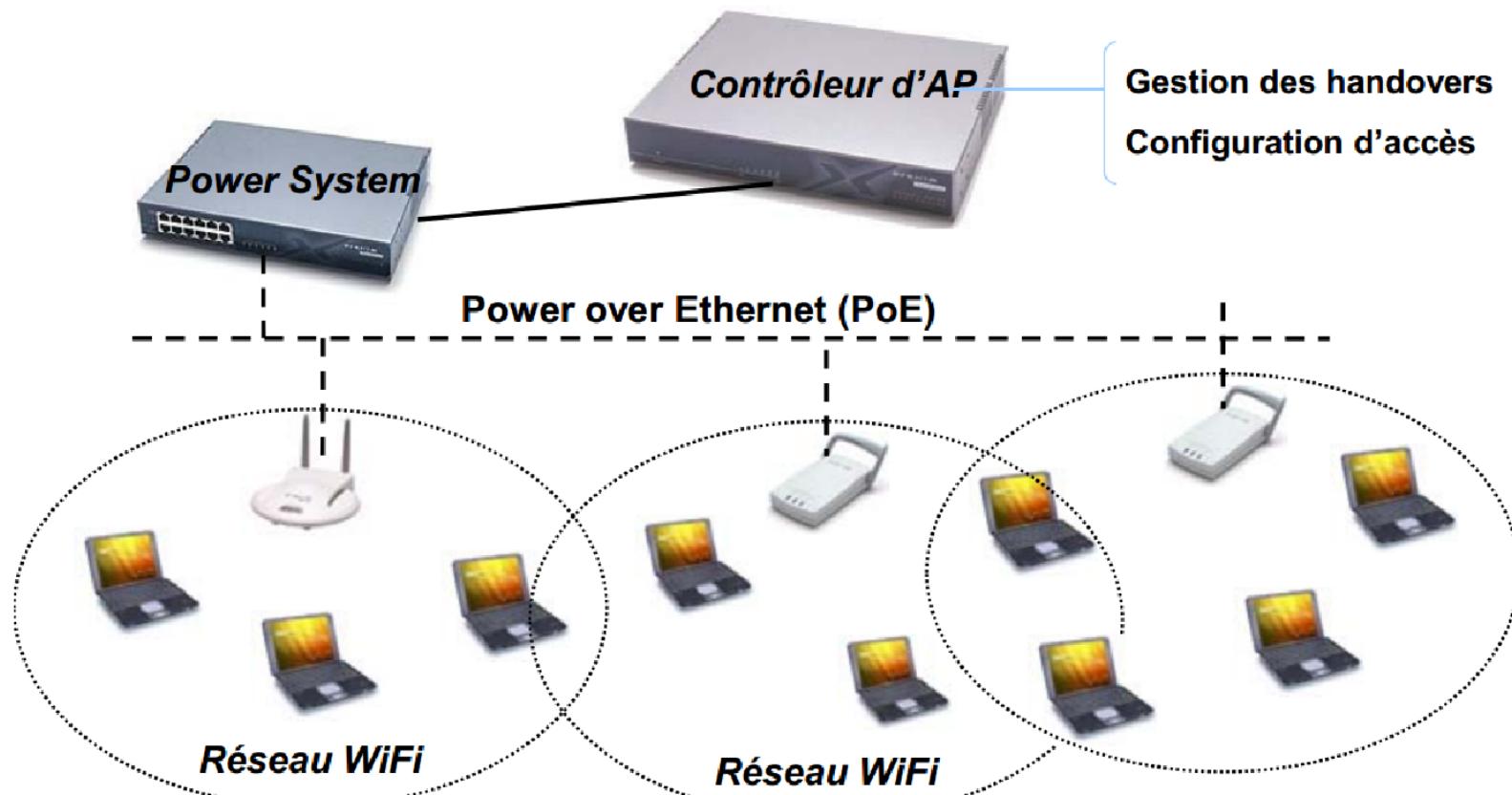
Avec infrastructure



Sans infrastructure  
= réseau ad hoc  
= MANET (Mobile Area Network)

# Catégorie des Réseaux sans-Fil: WIFI

## □ Réseaux WIFI (WIreless FIdelity)



# Catégorie des Réseaux sans-Fil: WIFI

## □ Réseaux WIFI (WIreless FIdelity): Limites

□ **Environnement:** Murs, meubles, objets divers

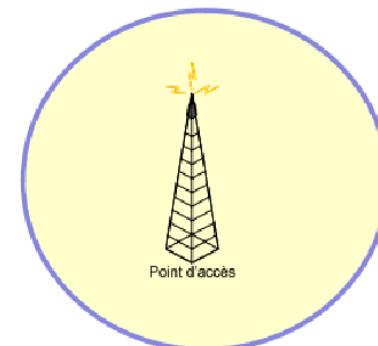
□ **Distance entre équipements**

□ **Interférences:**

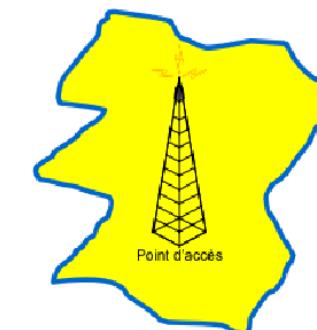
□ Autres réseaux voisins:

□ Fours à micro-ondes

□ Autres équipements



Portée idéale

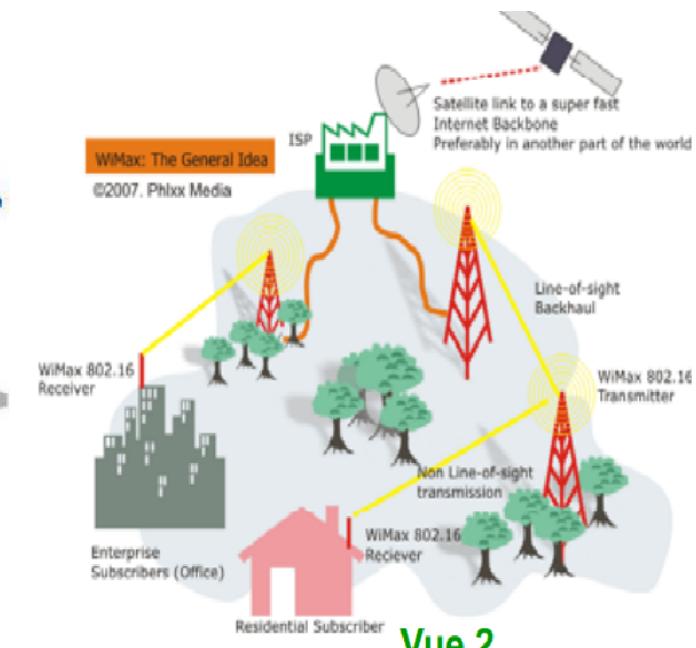
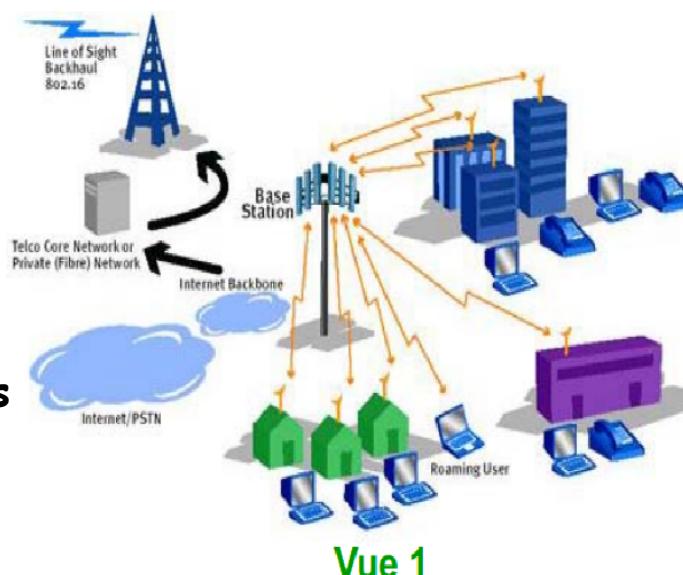


Portée réelle

# Catégorie des Réseaux sans-Fil: WiMAX

## □ Réseaux WiMAX (Std IEEE 802.16): Worldwide interoperability for Microwave Access

- Réseau métropolitain (ou d'agglomération)
- système de transmission et d'accès à Internet à haut débit, portant sur une zone géographique étendue
- 50 km à 70 Mb/s (en théorie)  
10 km à 20-30 Mb/s (en pratique)



# Catégorie des Réseaux sans-Fil: WiMAX

- Réseaux WiMAX mobile (Std IEEE 802.16e): Specification
- Fréquence < 35 GHz
- Au moins 1 Mbit/s par utilisateur
- Garantie la qualité de service QoS

# Catégorie des Réseaux sans-Fil: WiMAX

## □ Réseaux WiMAX (Std IEEE 802.16): Exemples d'antennes

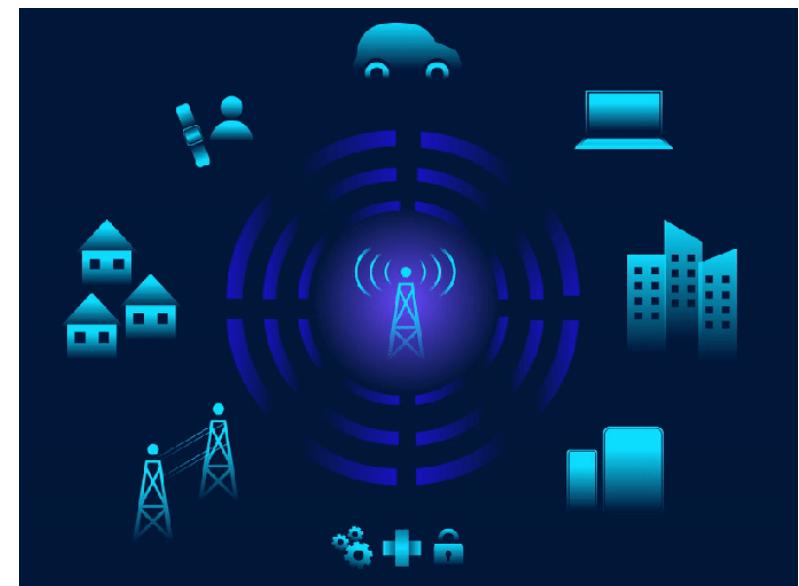


# Catégorie des Réseaux sans-Fil: WRAN

- Réseaux WRAN -Wireless Regional Area Network (Std IEEE 802.22)
- Réseau sans fil utilisant les bandes de fréquences VHF et UHF (Bande déjà utilisées pour la télévision)
- LES WRAN utiliseront les fréquences laissées libres par les canaux de télévision pour éviter les interférences
- Portée pouvant atteindre jusqu'à une **centaine de km** autour de l'émetteur (Permet de couvrir les zones faiblement peuplées telles que les zones rurales)
- Utilise la technologie de codage radio OFDMA
- **300 MHz** de bande passante: 30 000 utilisateurs multimédia par point d'accès

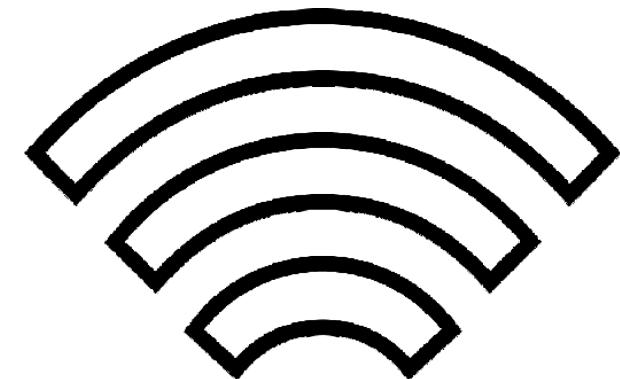
# Catégorie des Réseaux sans-Fil: WWAN

- Connu également sous le nom de réseaux cellulaires mobile (téléphonie mobile)
- Les principales technologies sont les suivantes :
- **GSM** (Global System for Mobile Communications ou en français Groupe Spécial Mobile)
- **GPRS et EDGE** (General Packet Radio Service) dérivé du **GSM** et permettant des débits plus élevés
- **UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System) **3G**
- **LTE** (Long Term Evolution) **4G**



# Norme 802.11

- 1997: 802.11 normalisé par IEEE avec des débits théoriques de 1 à 2 Mbit/s en bande radio 2,4 GHz
- septembre 1997: norme 802.11a pour des débits de 54Mbit/s en bande radio 5 GHz
- 1999: la norme 802.11b voit le jour
- Le 802.11 fait partie de la familles des bandes de fréquences ISM (Industrial, Scientific and Medical)



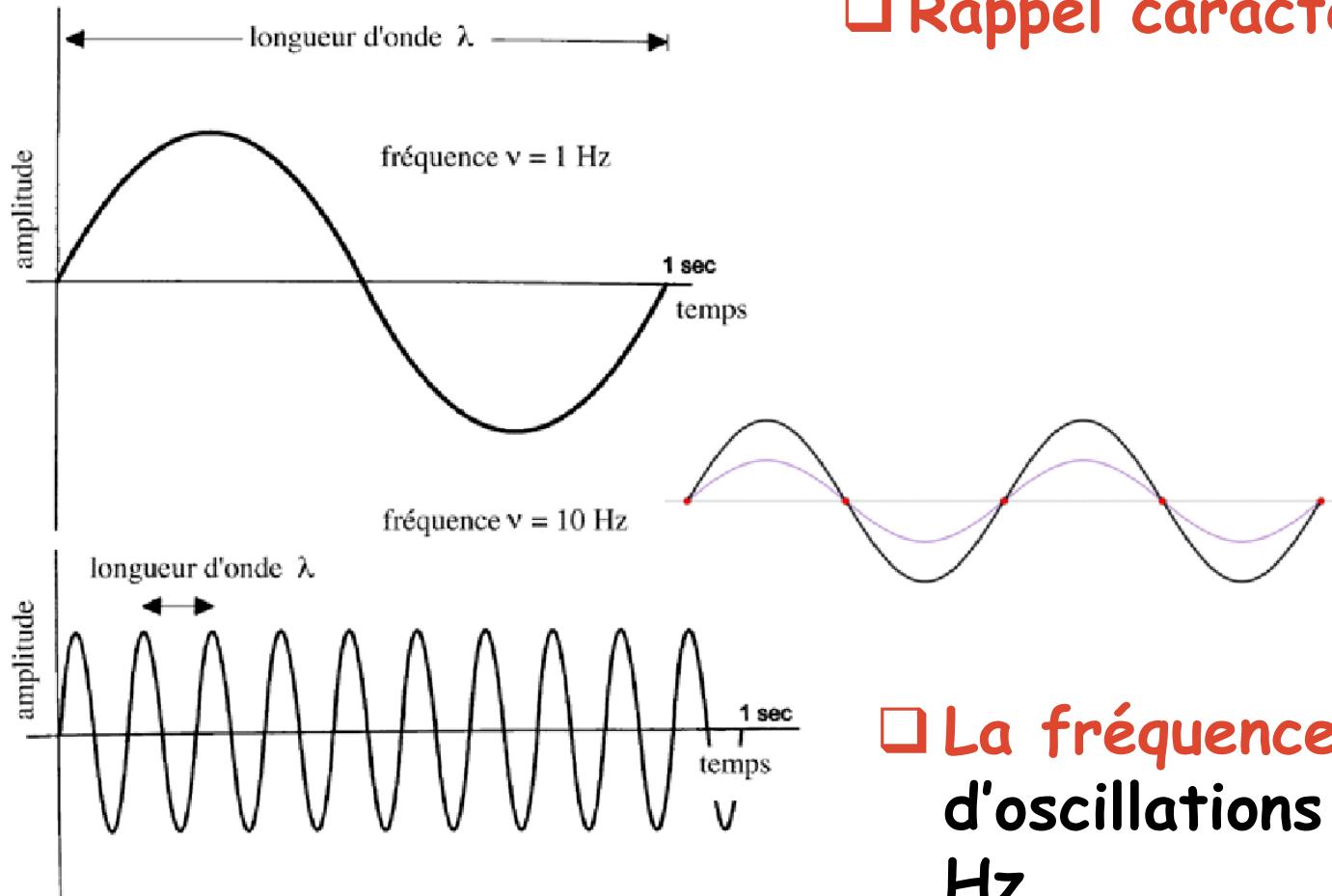
# Norme 802.11

Wlan norme	Fréquence	Bande passante	Débit max (x stream)	Modulation
802.11 (juin 1997)	2.4 GHz	22MHz	2Mbps (x1)	DSSS, FHSS
802.11a (Sep 1997)	5GHz	20MHz	54Mbps (x1)	OFDM
802.11b (Sept. 1999)	2.4GHz	20MHz	11Mbps (x1)	DSSS
802.11g (Juin 2003)	2.4GHz	20MHz	54Mbps (x1)	DSSS, OFDM

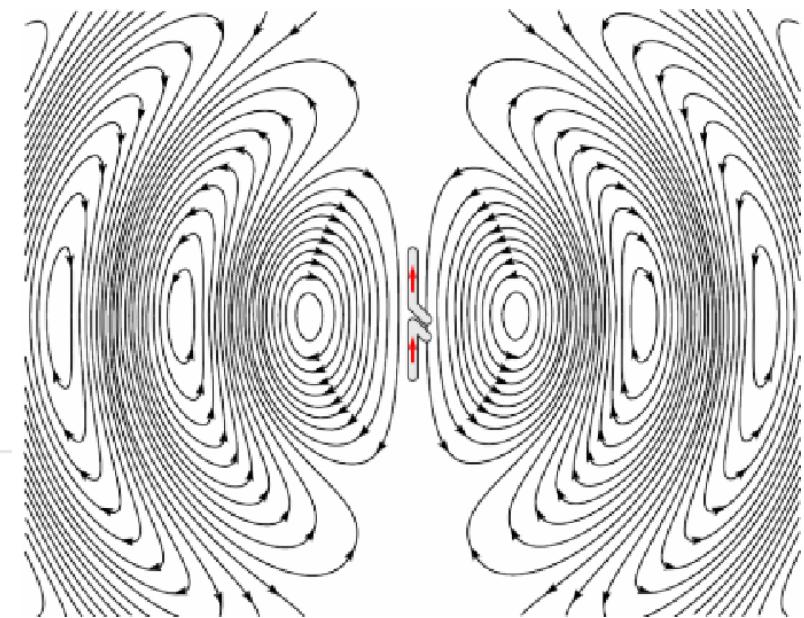
# Norme 802.11

Wlan norme	Fréquence	Bande passante	Débit max (x stream)	Modulation
802.11n (Oct. 2009)	2.4 GHz	20MHz	72.2Mbps (x4)	OFDM (up 64QAM)
		40MHz	150Mbps (x4)	
	5GHz	20MHz	72.2Mbps (x4)	
		40MHz	150Mbps (x4)	
802.11ac (1 norme 2013) (2° norme 2014)	5GHz	20MHz	87.6Mbps (x8)	OFDM (up 256QAM)
		40MHz	200Mbps (x8)	
		80MHz	433.3Mbps (x8)	
		160MHz	866.7Mbps (x8)	

# L'onde radio

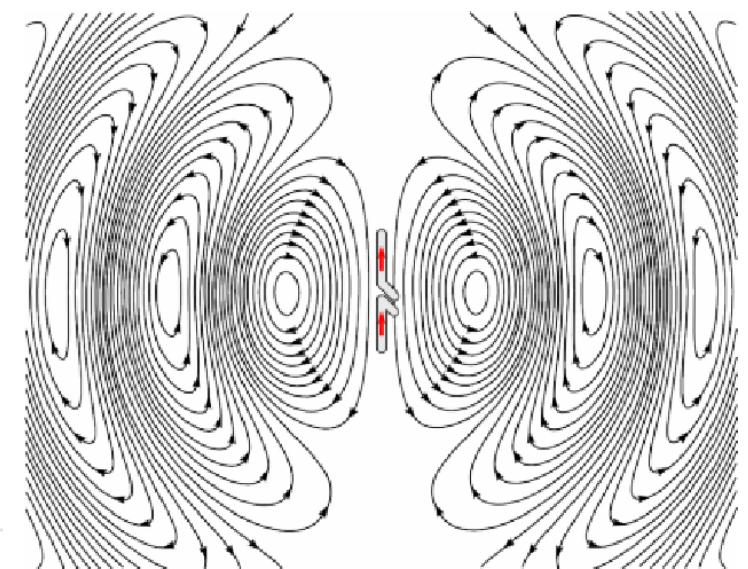
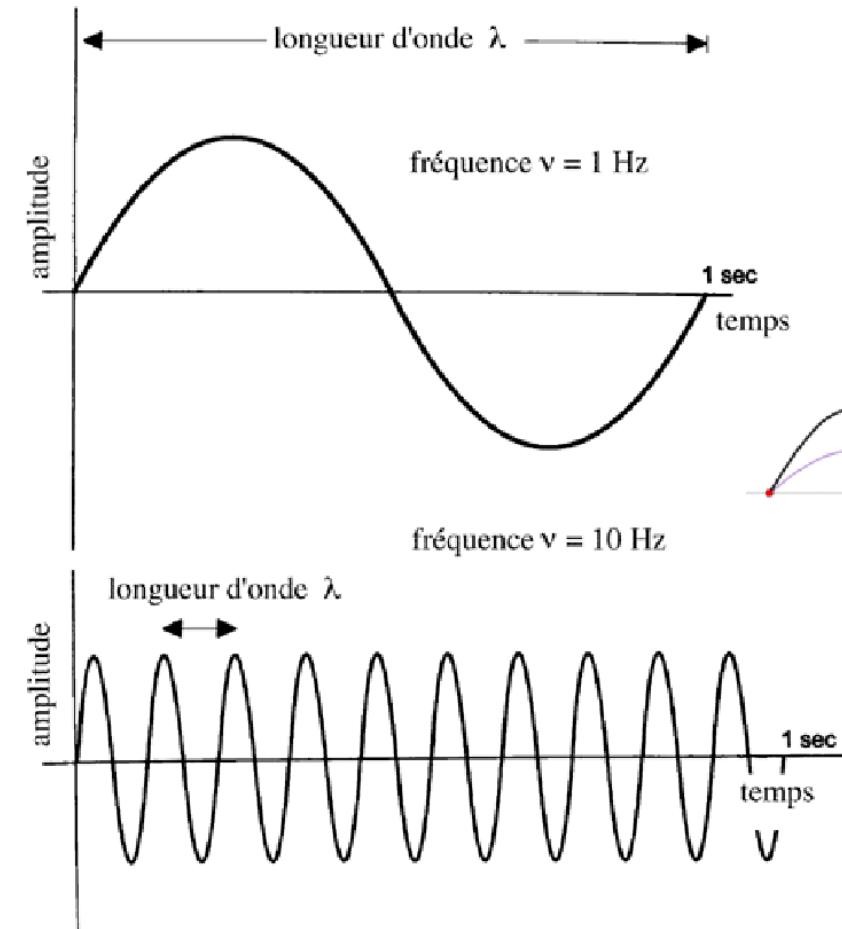


□ Rappel caractéristiques de l'onde radio



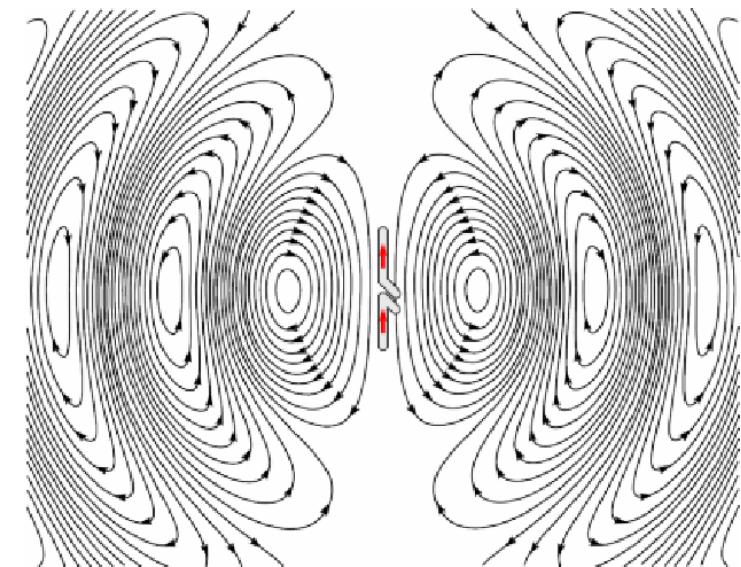
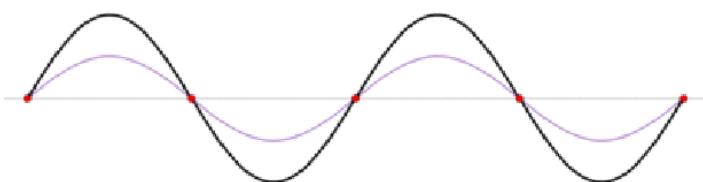
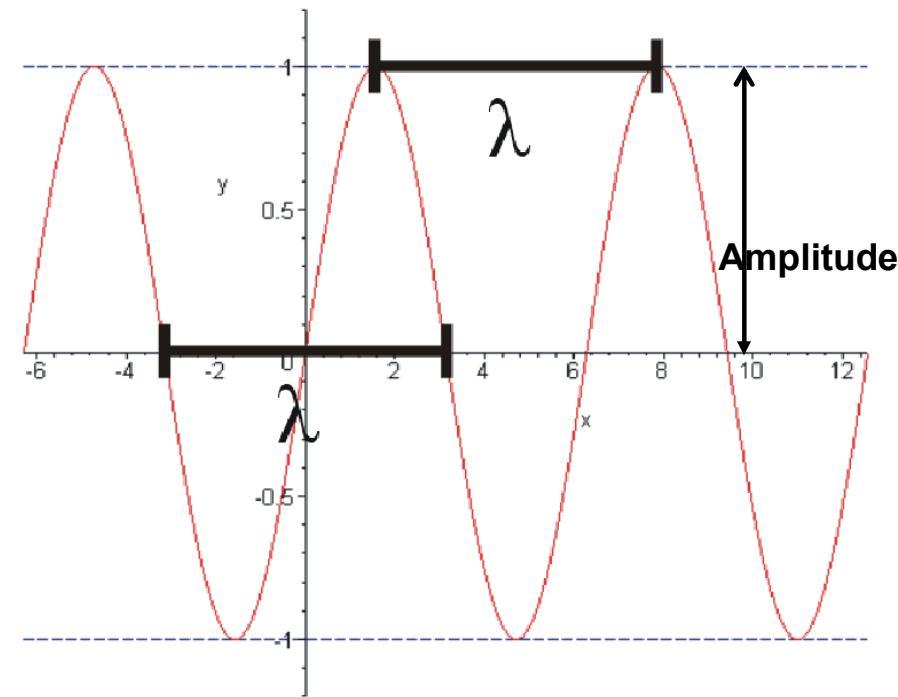
□ La fréquence de l'onde (f) : nombre d'oscillations par seconde, mesurée en Hz

# L'onde radio



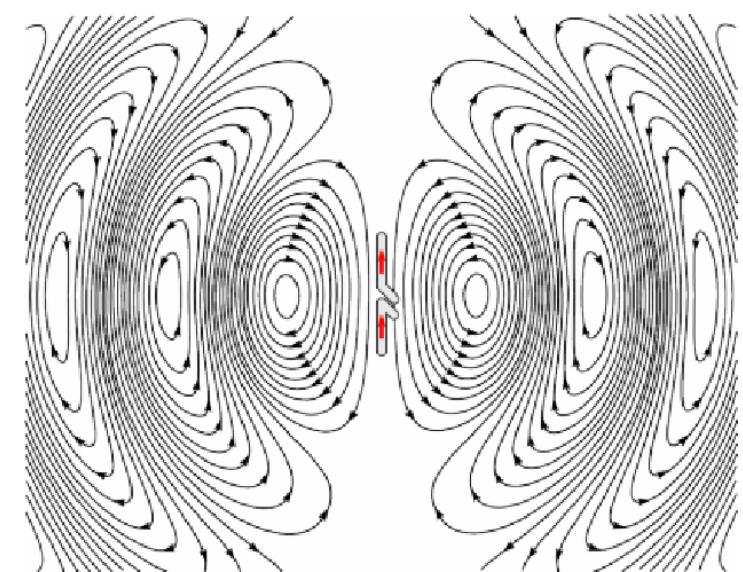
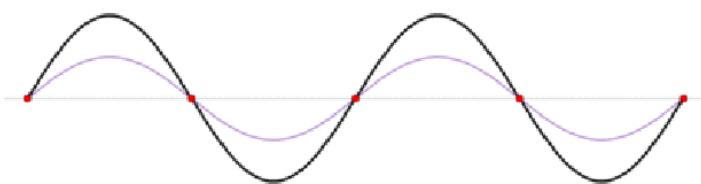
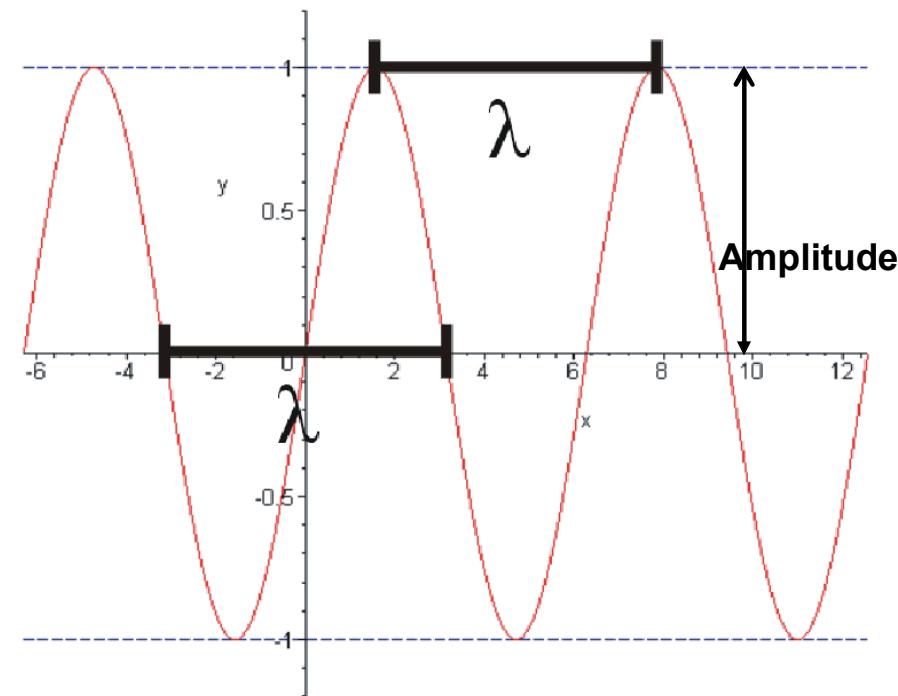
□ La période ( $T$ ) est la durée d'une oscillation complète, mesurée en sec et égale à l'inverse de la fréquence  
 $T = 1/f$

# L'onde radio



- La longueur d'onde, notée  $\lambda$  et mesurée en mètres (**m**), est la distance parcourue par l'onde pendant une période (une oscillation).  
$$\lambda = c/f = c \times T$$

# L'onde radio



□ L'amplitude de l'onde est la hauteur de l'onde.  
L'intensité de l'onde est le carré de  
l'amplitude et détermine sa puissance

# Norme 802.11

## □ Caractéristiques de l'onde radio

- La puissance  $P$  de l'onde dépend de l'amplitude et de la fréquence. Elle se mesure en Watt (w) ou en dBm

$$\text{Puissance}_{\text{dBm}} = 10 \times \log (\text{Puissance}_{\text{mW}})$$

et

$$\text{Puissance}_{\text{mW}} = 10^{\left( \frac{\text{Puissance}_{\text{dBm}}}{10} \right)}$$

- Les émetteurs wifi émettent généralement des ondes de l'ordre de 100mW.  
appelé également décibels de mW

# Norme 802.11

## □ Caractéristiques de l'onde radio

Linear Ratio	dBm Value	Linear Ratio	dBm Value
1mW	0dBm	1mW	0dBm
2mW	+3dBm	.5mW	-3dBm
4mW	+6dBm	.25mW	-6dBm
10mW	+10dBm	.1mW	-10dBm
20mW	+13dBm	.05mW	-13dBm
100mW	+20dBm	.01mW	-20dBm
1000mW	+30dBm	.001mW	-30dBm
10000mW	+40dBm	.0001mW	-40dBm
100000mW	+50dBm	.00001mW	-50dBm

$$Puissance_{dBm} = 10 \times \log(Puissance_{mW})$$

et

$$Puissance_{mW} = 10^{\left(\frac{Puissance_{dBm}}{10}\right)}$$

Linear Domain	Decibel Units
x2	+3dBm
x10	+10dBm
÷2	-3dBm
÷10	-10dBm

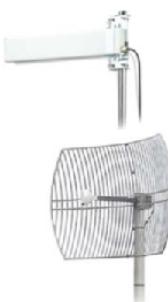
# Norme 802.11: Composants



Pont sans fils



Point d'accès



Antennes  
omni-directionnelles

Antennes directionnelles

carte PCI



carte PCI

clé usb

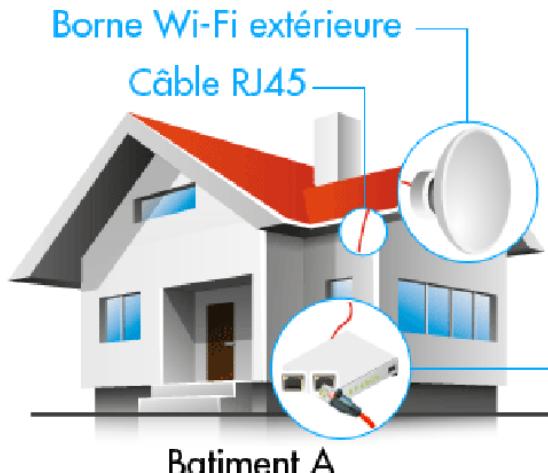


PCMCIA



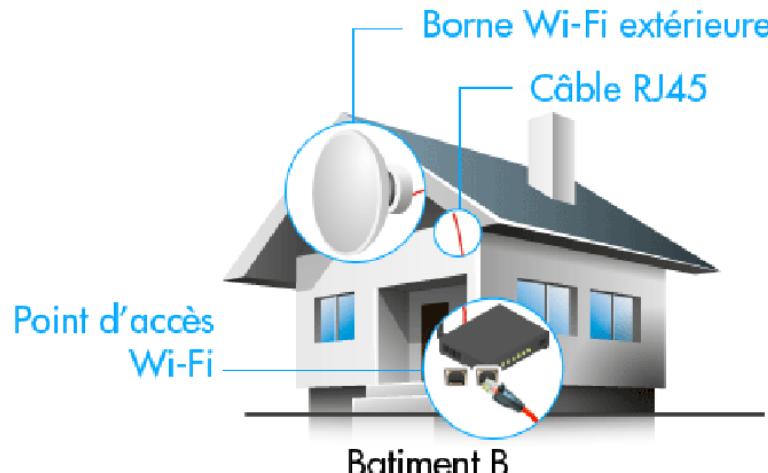
# Norme 802.11

## □ Pont wifi sans obstacle



Box ADSL

Batiment A



Point d'accès  
Wi-Fi

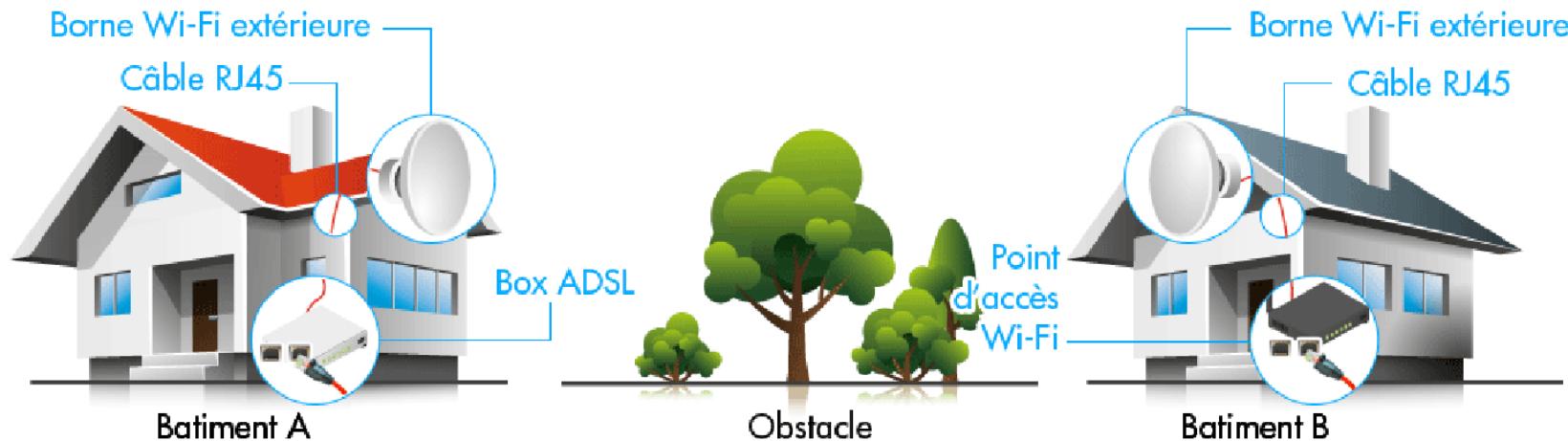
Batiment B

*Choisir 2,4 ou 5 GHz :*

2.4 GHz	5 GHz
+ Plus stable	+ Longue portée
+ Plus répandu	+ Plus gros débit maximal
+ Meilleur propagation des ondes	+ Plus de canaux disponibles
- En ville, peut être perturbé	- Plus sensible

# Norme 802.11

## □ Pont wifi avec obstacle

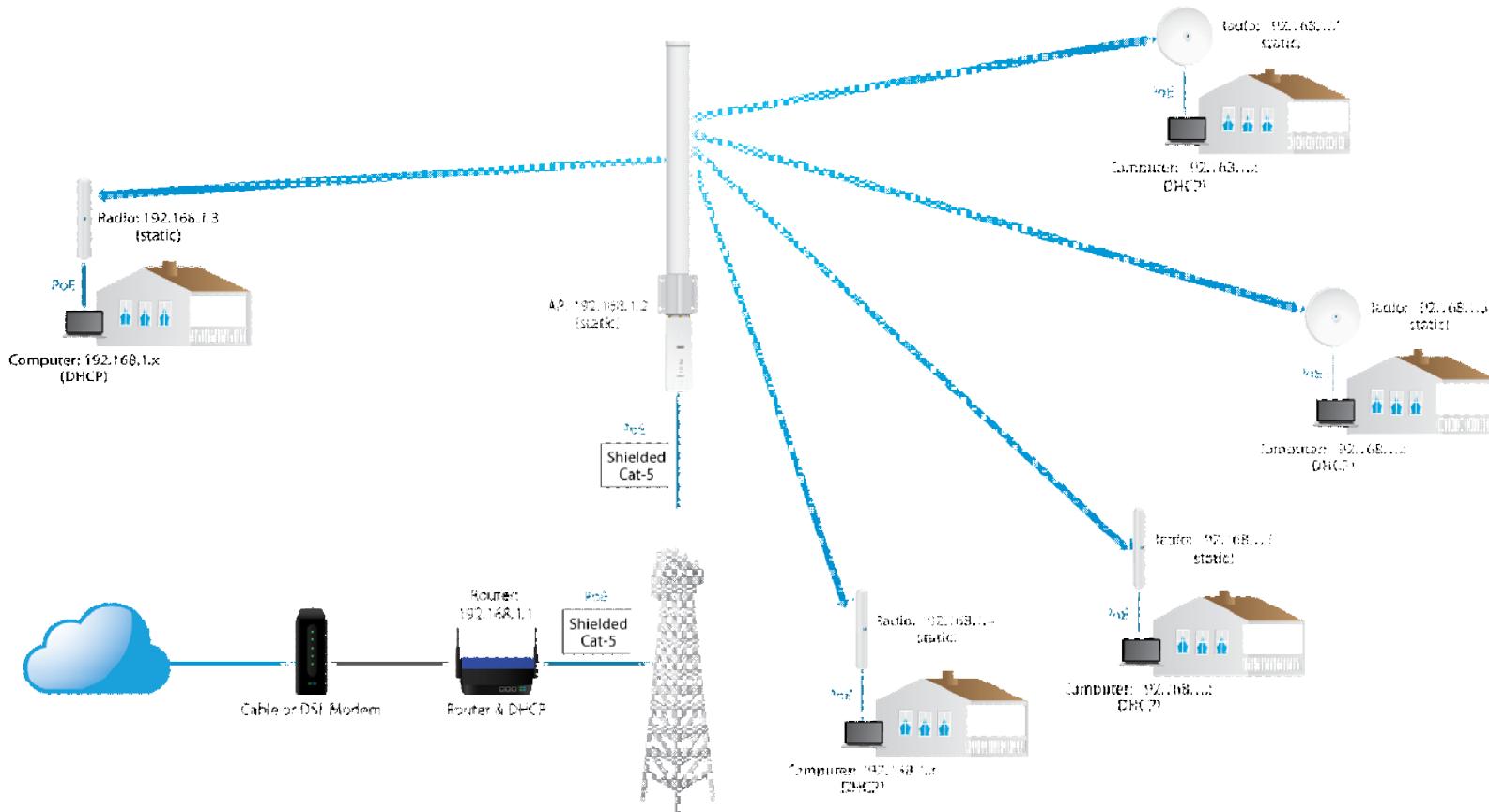


*Choisir 2,4 ou 5 GHz :*

2.4 GHz	5 GHz
+ Plus stable	+ Longue portée
+ Plus répandu	+ Plus gros débit maximal
+ Meilleur propagation des ondes	+ Plus de canaux disponibles
- En ville, peut être perturbé	- Plus sensible

# Norme 802.11: Architecture

## □ Mode point multi-points

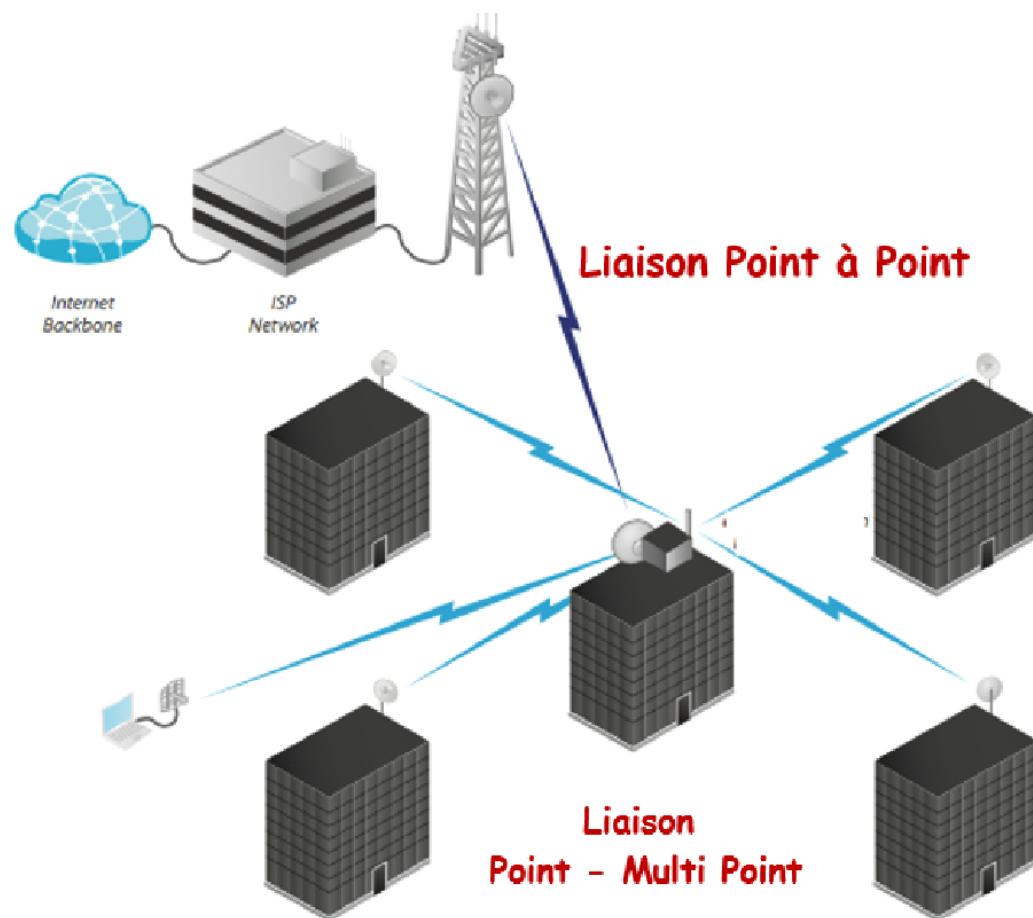


# Norme 802.11: Architecture

## Mode point à point



# Norme 802.11: Architecture



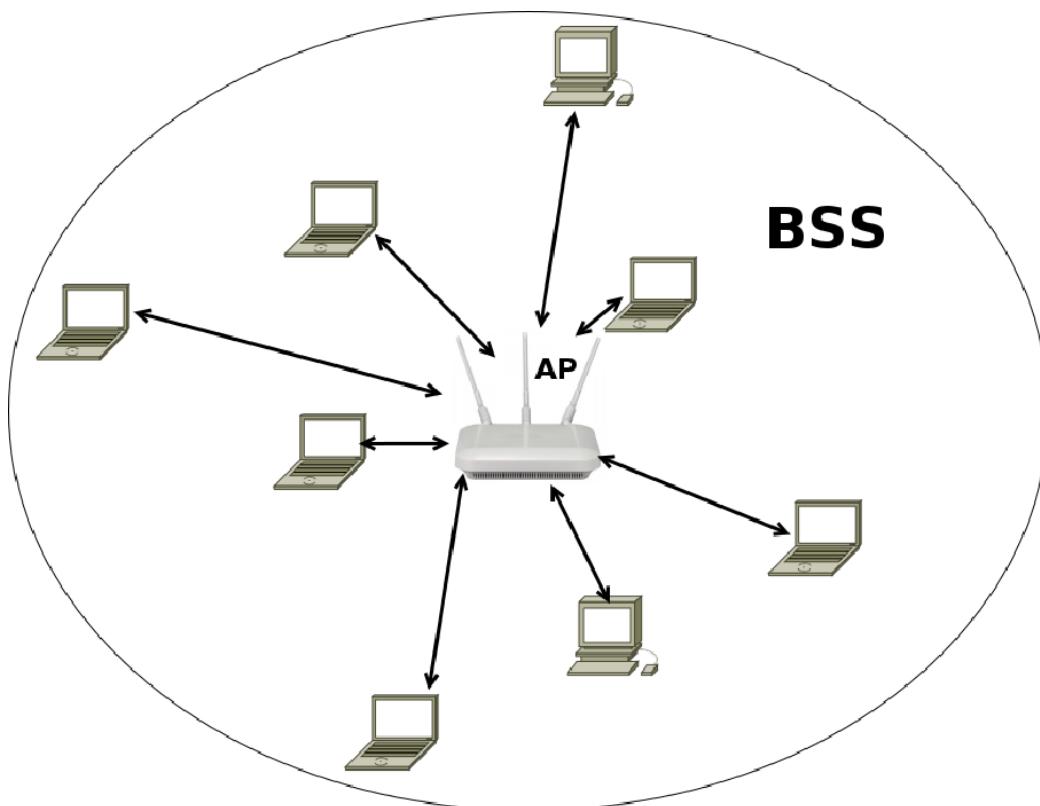
# Norme 802.11: Architecture

## Mode Infrastructure

- Fournit aux différentes stations des services spécifiques sur une zone de couverture déterminée par la taille du réseau
- Utiliser des points d'accès ou Acces Points (**AP**), qui jouent le rôle de stations de base
- L'ensemble formé par le **AP** et les **stations** situé dans sa zone de couverture est appelé ensemble de **services de base (BSS, Basic Service Set)** et constitue une cellule
- Chaque **BSS** est identifié par un **BSSID**, un identifiant de 6 octets (48 bits). Il correspond à l'adresse MAC du point d'accès

# Norme 802.11: Architecture

## Mode Infrastructure



# Norme 802.11: Architecture

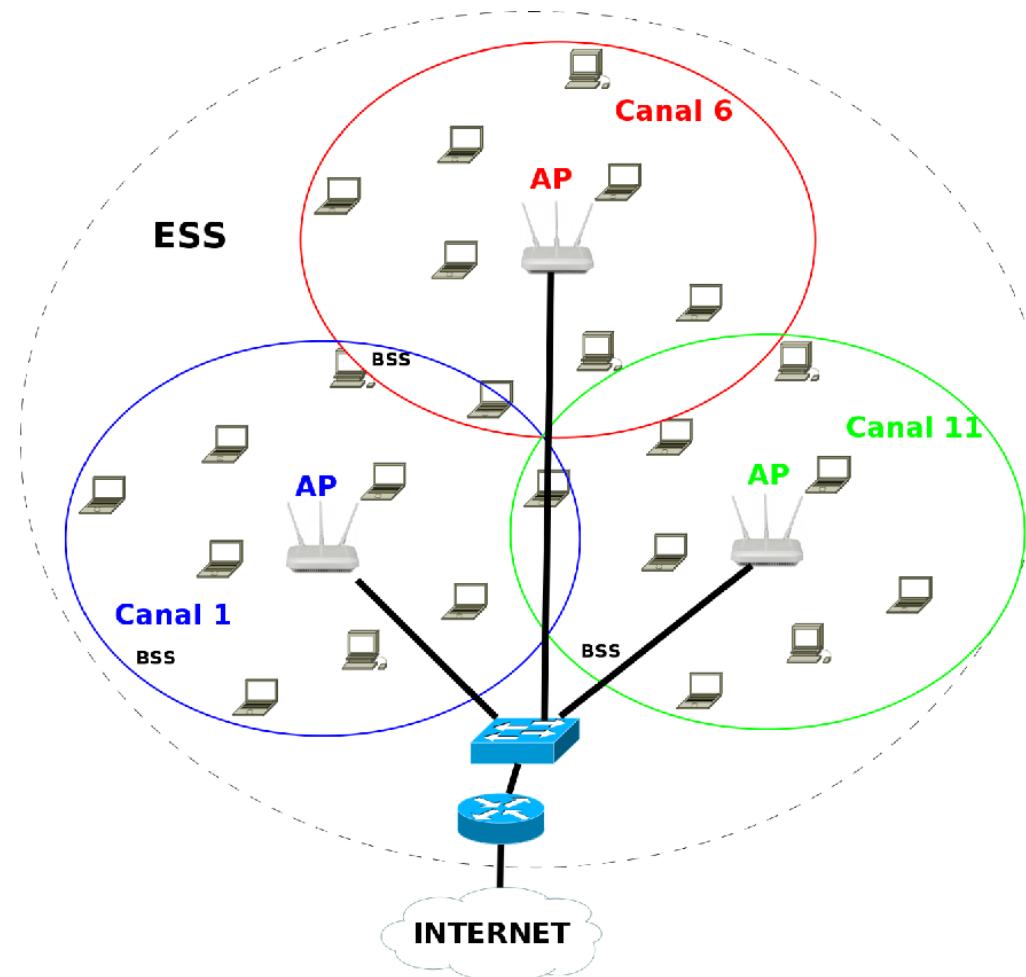
## Mode Infrastructure

- Possibilité de relier plusieurs AP entre eux par un système de distribution (DS, Distribution System) afin de contrôler un ensemble de services étendu (ESS, Extended Service Set).
- Le système de distribution peut être un réseau filaire, un câble entre deux AP ou un réseau sans fil.
- Un ESS est repéré par un ESSID, identifiant de 32 caractères servant de nom de réseau. Il est souvent abrégé en SSID
- Attention!!!!!! L'ensemble des APs d'un même ESS doivent avoir le même SSID

# Norme 802.11: Architecture

## □ Mode Infrastructure

## □ Architecture distribué



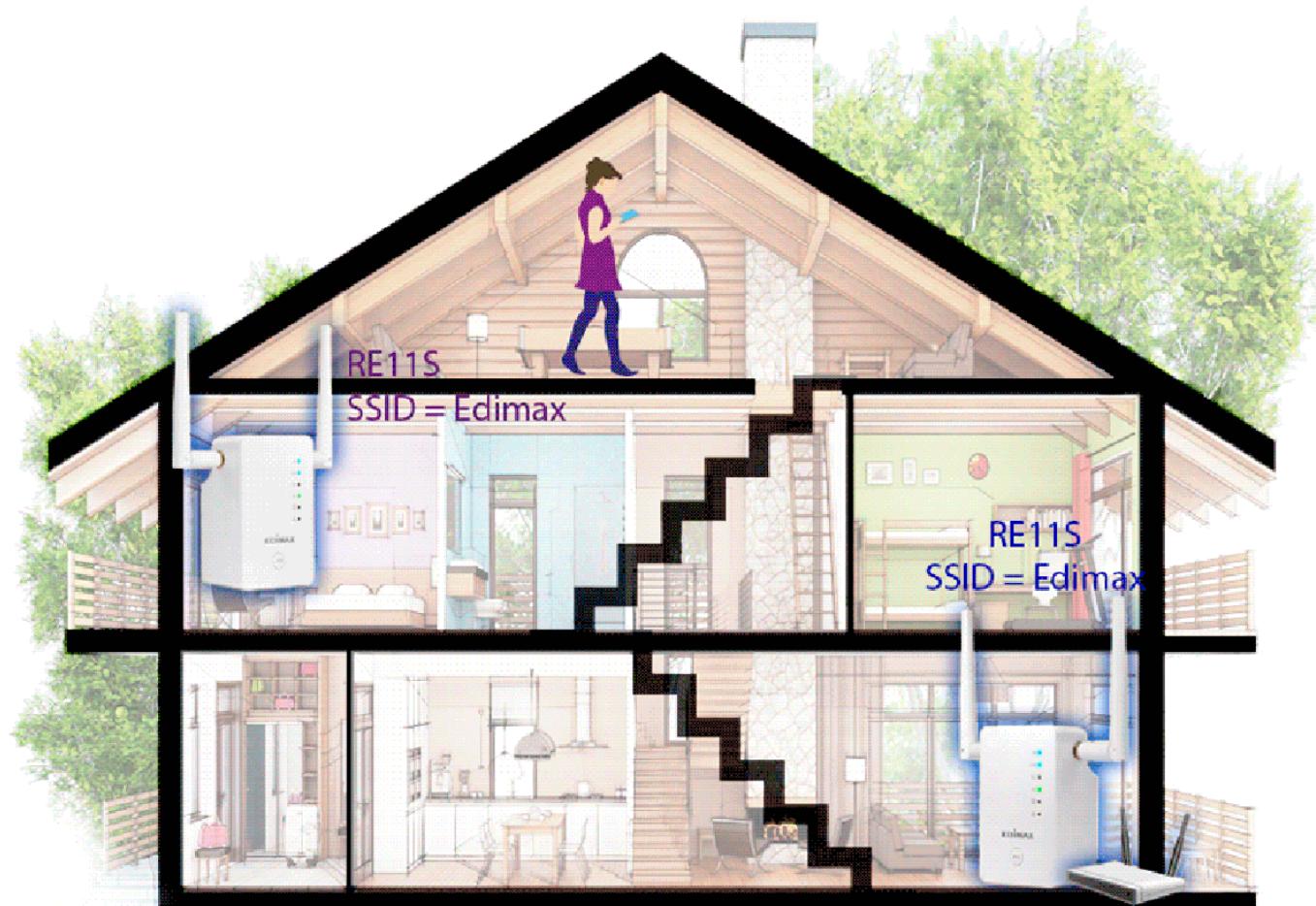
# Norme 802.11: Architecture

## □ Roaming

Lorsqu'un utilisateur nomade passe d'un BSS à un autre au sein d'un même ESS, l'adaptateur réseau sans fil est capable de changer de AP selon la qualité de réception des signaux provenant des différents APs (**Roaming**)

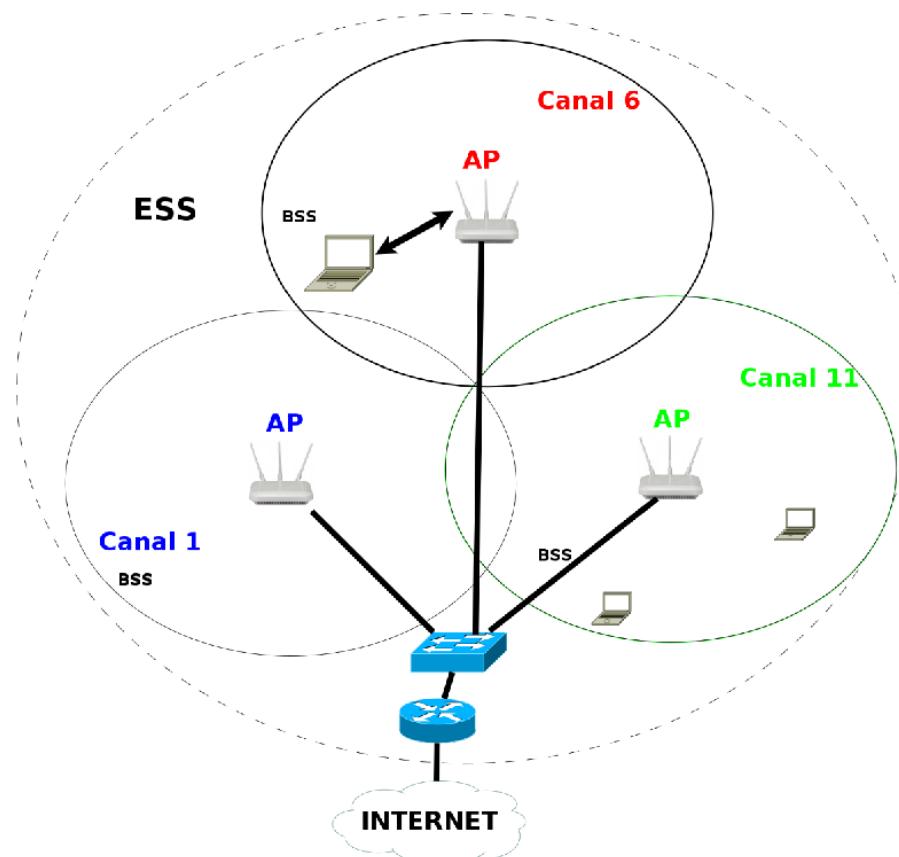
# Norme 802.11: Architecture

## □ Roaming



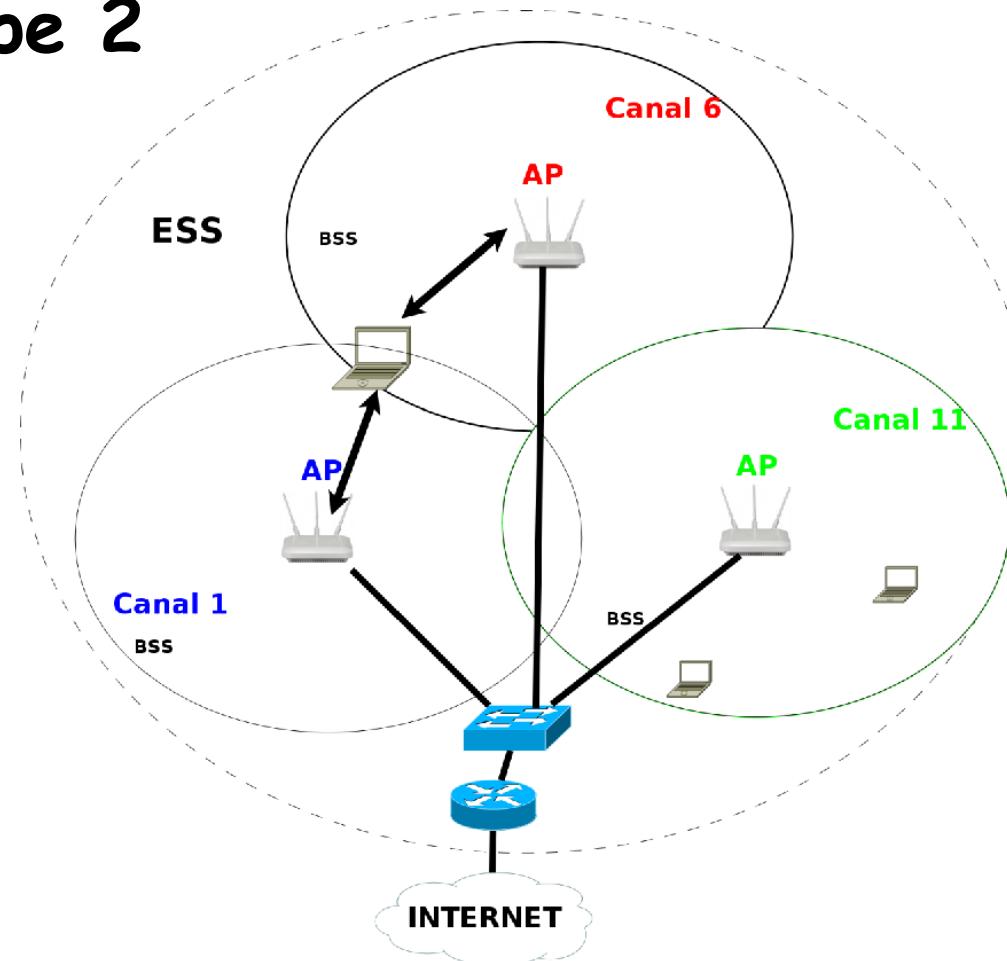
# Norme 802.11: Architecture

## □ Roaming étape 1



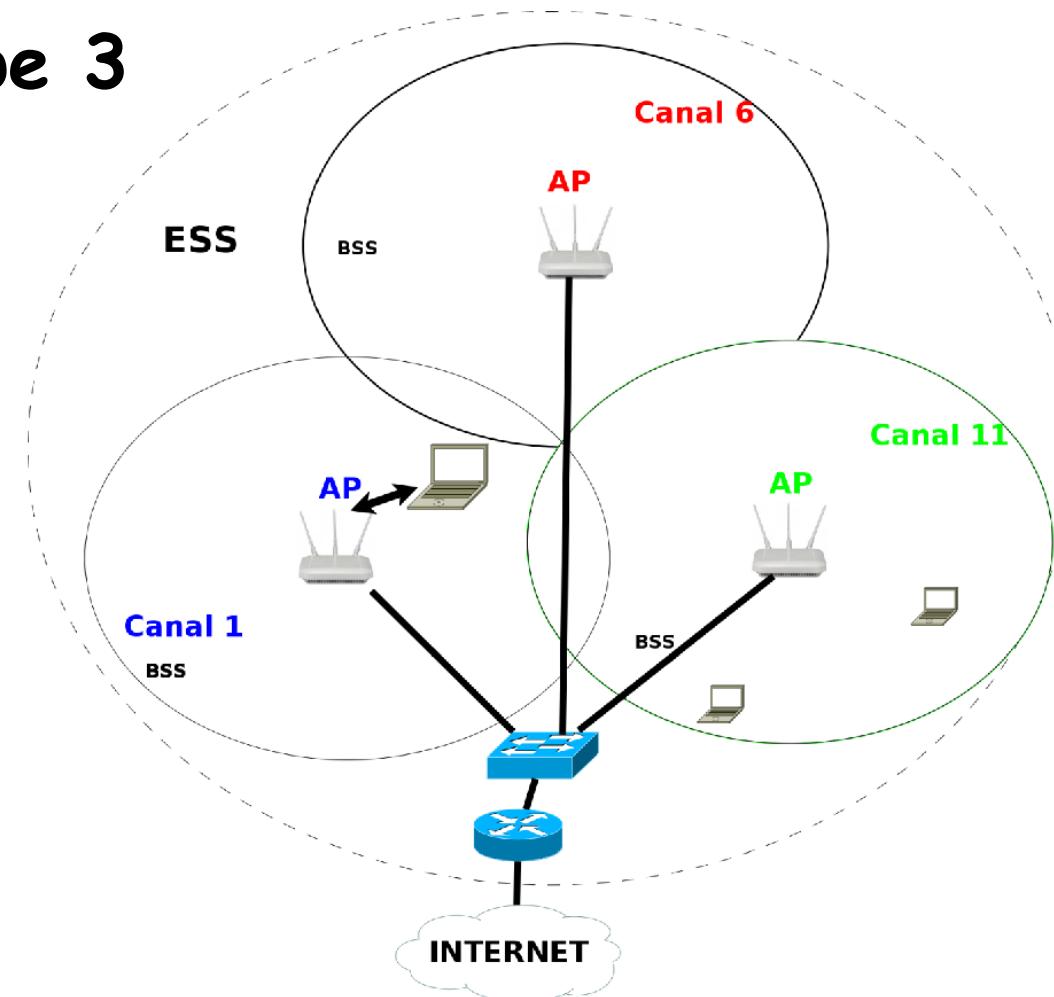
# Norme 802.11: Architecture

## ☐ Roaming étape 2



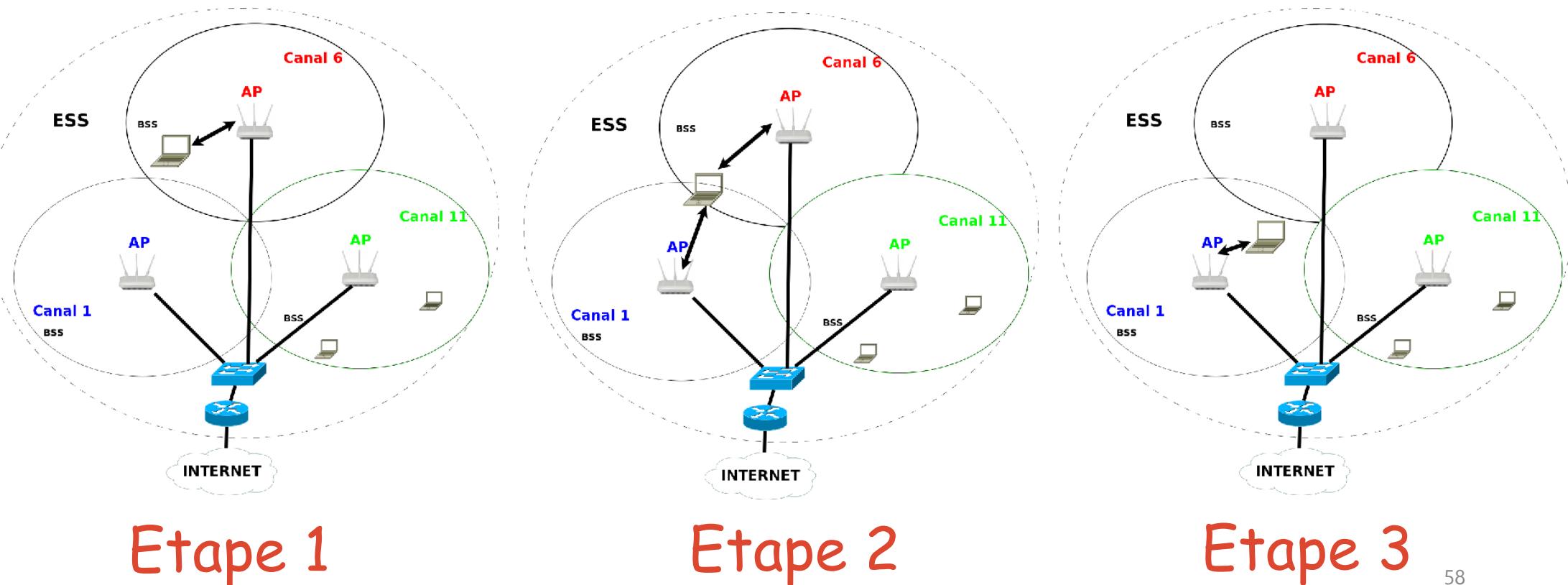
# Norme 802.11: Architecture

## ☐ Roaming étape 3



# Norme 802.11: Architecture

## □ Roaming dans le WIFI



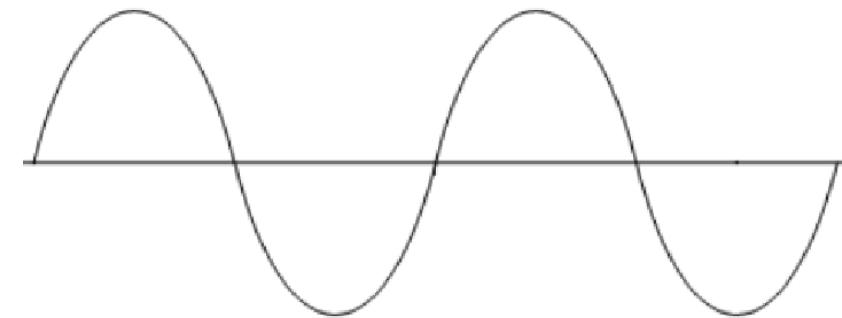
# Modulation

# Sommaire

- Rappel Modulation
- Modulation 802.11
- Propagation 802.11
- Bilan de liaison

# Modulation: Rappel

- La transmission hertzienne véhicule l'information par une onde appelée porteuse.
- Ce signal propage une information de forme analogique, constituée de seulement deux niveaux : **0 et 1**
- C'est par une modulation de la porteuse que le signal deviendra significatif



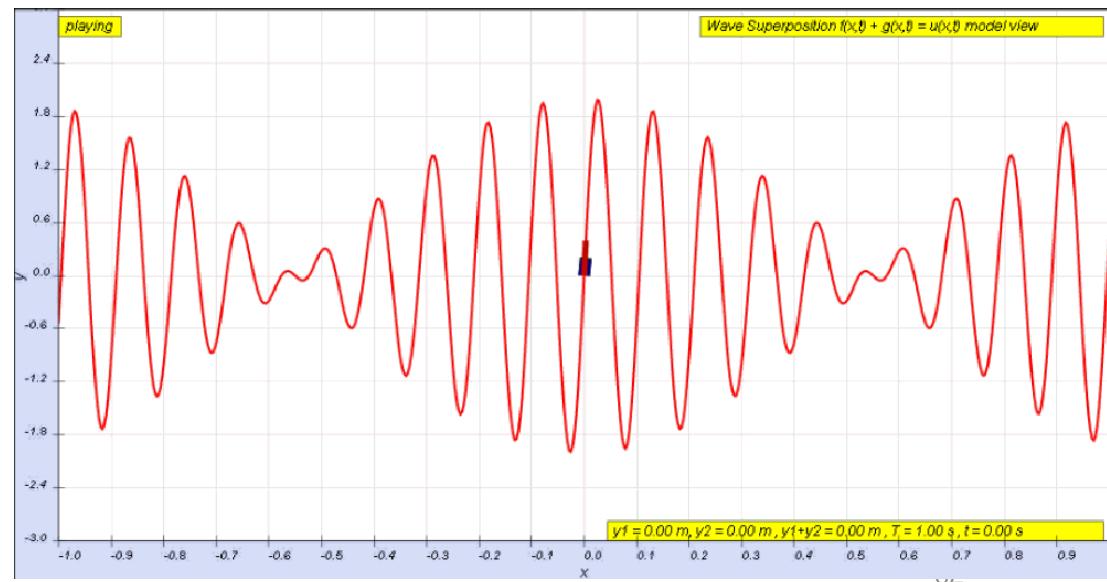
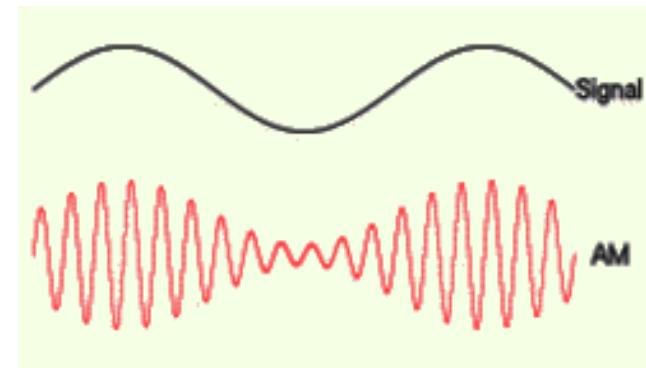
*La porteuse*

# Modulation: Rappel

## □ Modulation d'amplitude

□ Consiste à faire varier l'amplitude  
**AM (Amplitude Modulation)**

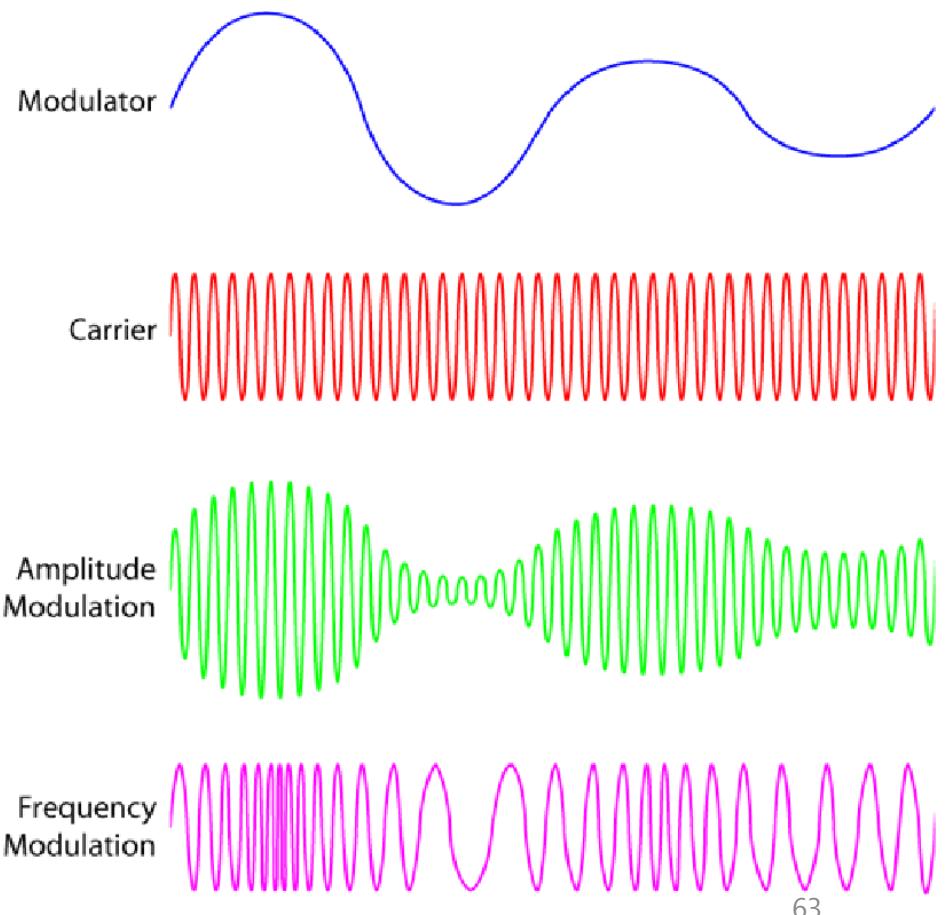
□ On l'utilise pour les communications longues distances, à basses fréquences et puissances élevées, comme en téléphonie.



# Modulation: Rappel

## □ Modulation de Fréquence

- Consiste à faire varier la fréquence  
**FM (Frequency Modulation)**
- Présente une très bonne résistance aux interférences
- Elle nécessite également moins de puissance que le AM
- Utilisé pour les transmissions de télévision et de radio stéréo.

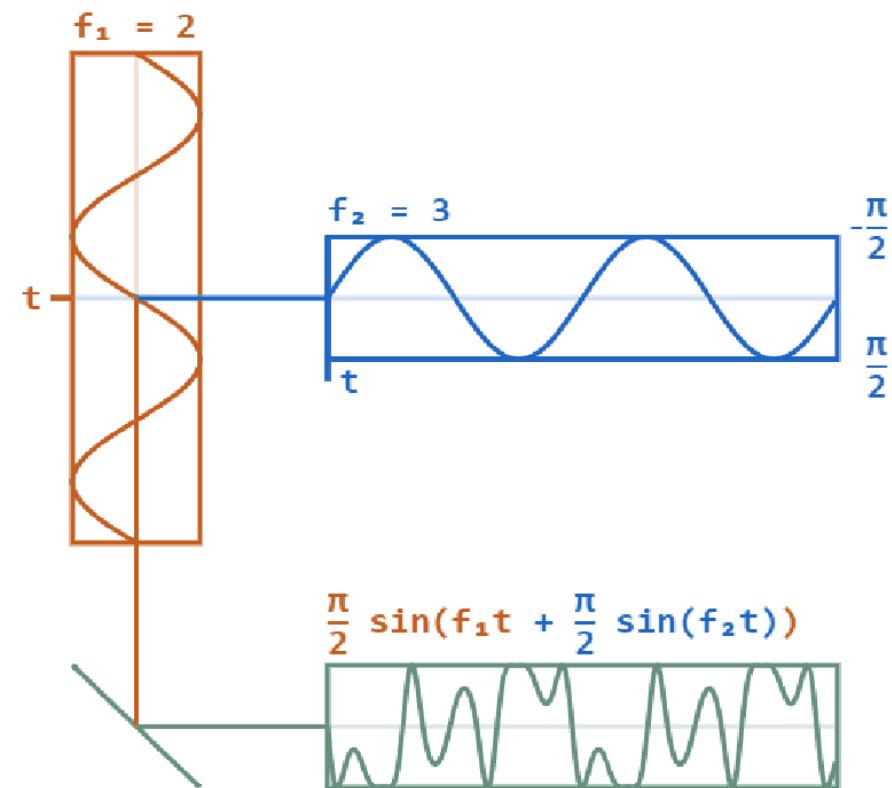


# Modulation: Rappel

## □ Modulation de Phase

□ Consiste à modifier la Phase  
PM (Phase Modulation)

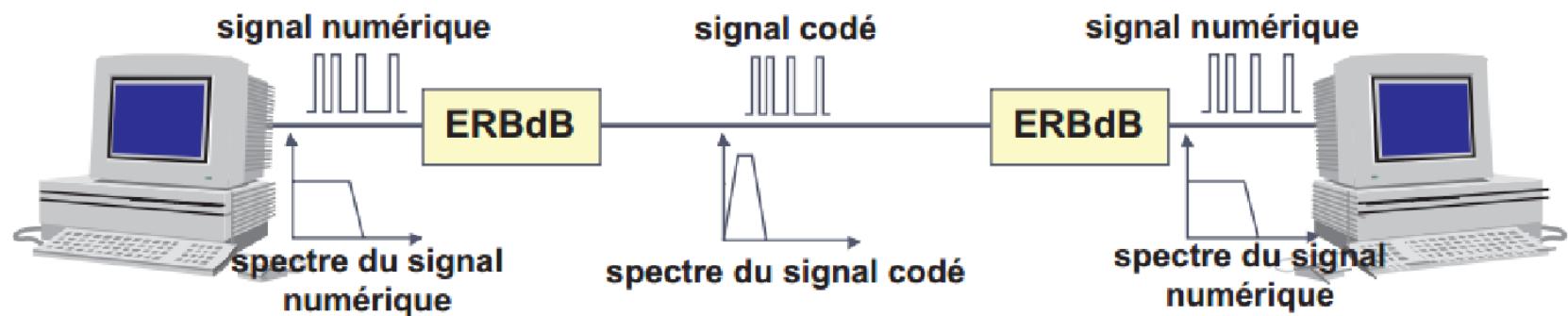
□ Elle est particulièrement  
indiquée dans les  
transmissions numériques.



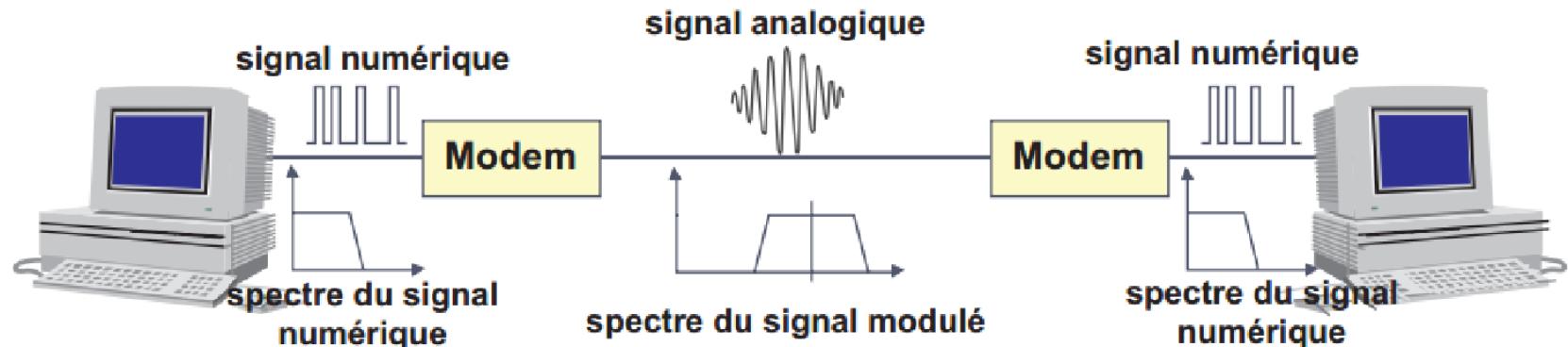
# Modulation: Rappel

## □ Principe

### Transmision en bande de base



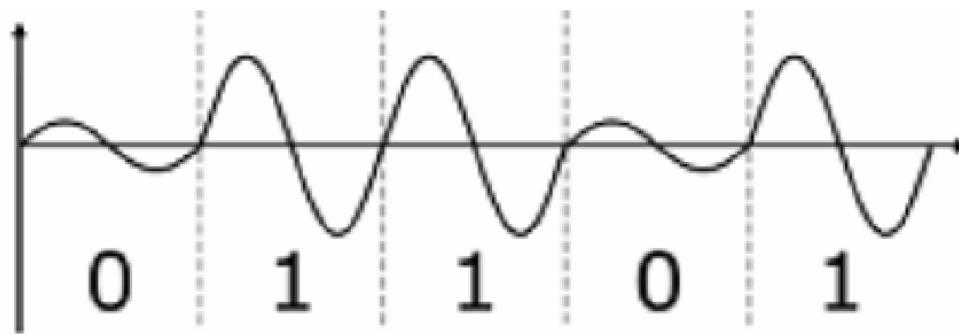
### Transmission en large bande



# Modulation Numérique

## □ ASK (Amplitude Shift Keying)

- Le signal indiquant le "0" a pour amplitude la moitié de celui du "1".

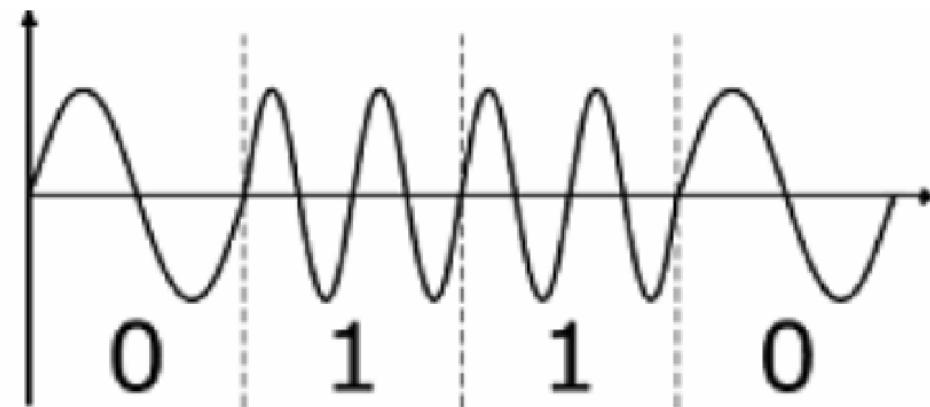


*Codage ASK*

# Modulation Numérique

## □ FSK (Frequency Shift Keying)

- La fréquence indiquant le "0" peut être la moitié de celle du "1"



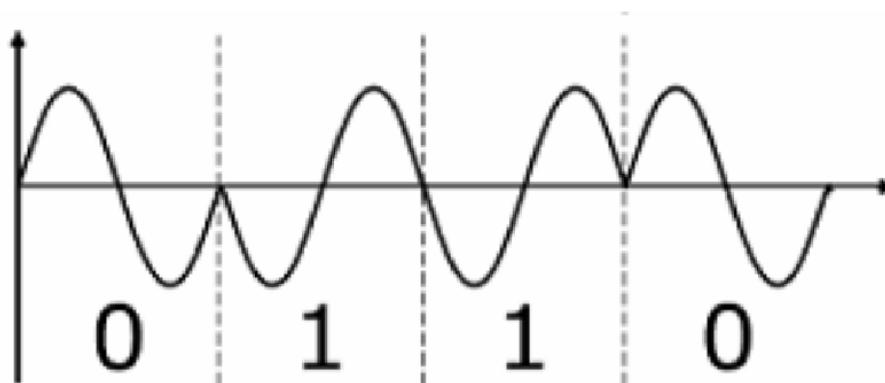
*Codage FSK*

# Modulation Numérique

## □ PSK (Phase Shift Keying)

- En PSK deux conventions sont utilisées

1. Dans la première, un **même état du signal** indique toujours la **même valeur**



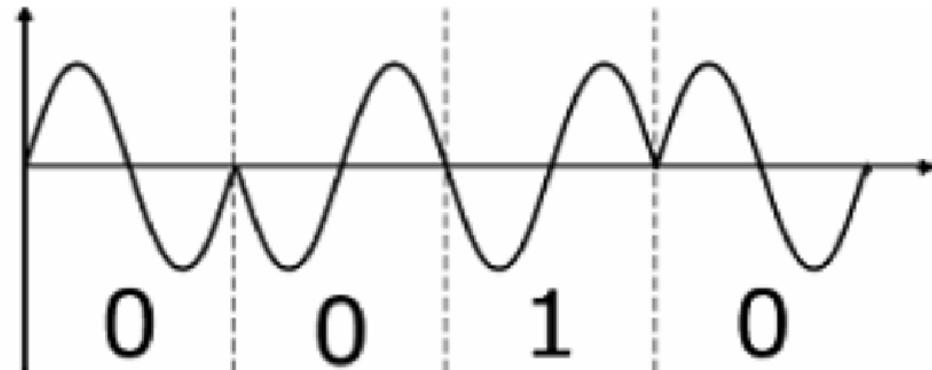
*Codage PSK, avec phase correspondant à la valeur binaire*

# Modulation Numérique

## PSK (Phase Shift Keying)

2. Dans la seconde, la convention **peut** indiquer qu'un **changement de phase** marque une valeur "0", et qu'une **absence de changement** est un "1"

Cette méthode de **codage différentiel (Differential PSK)** est utilisée par la **technologie WiFi**.



Codage Differential PSK, avec changement de phase pour le 0

# Modulation Numérique: Notion de valence

- Les modulations déjà vues ne transmettent qu'un seul bit à chaque période, soit deux états possibles. Elles sont qualifiées de **bivalentes**

- La notion de **valence** ( $v=1/p$ ) précise le nombre d'états que peut avoir un signal

$$D = R \cdot \log_2 v = 2 \cdot BP \cdot \log_2 v$$

- **Exemple!** Si la fréquence de la porteuse est de 1Hz, soit une période d'une seconde, les modulations déjà vues transmettent à 1 bit par seconde (1 bps), correspondant à 2 bauds (2 états par seconde)

- Pour permettre des débits plus rapides à une fréquence donnée, il est nécessaire d'augmenter la valence. **Ex** si un codage permet de transmettre 2 bits à chaque période,  $2^2$  états, soit quatre (quadrivalence) sont possibles

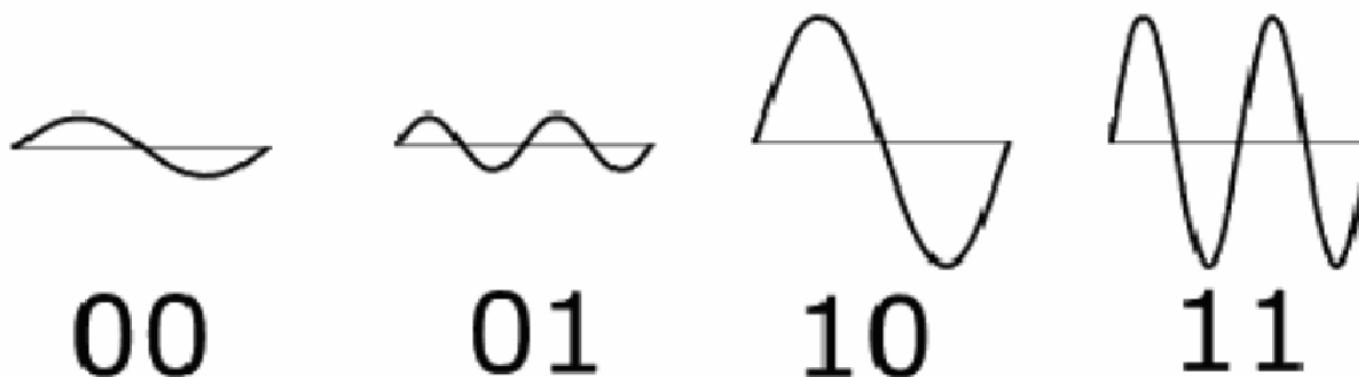
- Une modulation regroupant plusieurs bits est appelée un **symbole**.

# Modulation: Les combinaisons de modulation

## Les combinaisons simples

### 1. Combiner la modulation d'amplitude et de fréquence:

- 4 niveaux au moins peuvent être définis

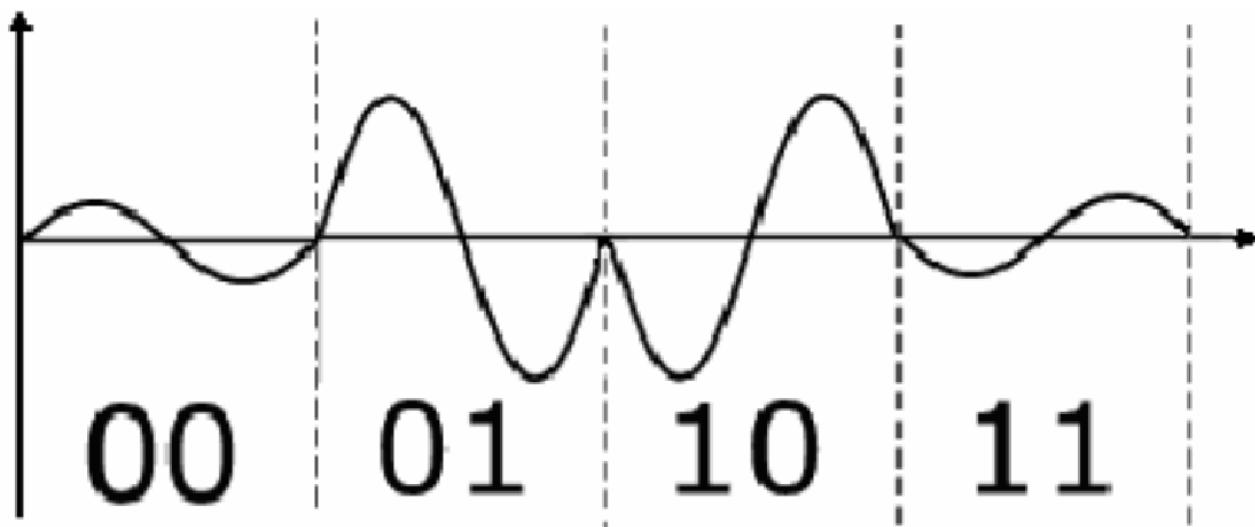


*Codage en quadrivalence, utilisant modulation de fréquence et d'amplitude*

# Modulation: Les combinaisons de modulation

## Les combinaisons simples

2. Fixer la fréquence et combiner la modulation d'amplitude et la modulation de phase:



Combinaison de phase et d'amplitude pour quadrivalence

# Modulation: Les combinaisons de modulation

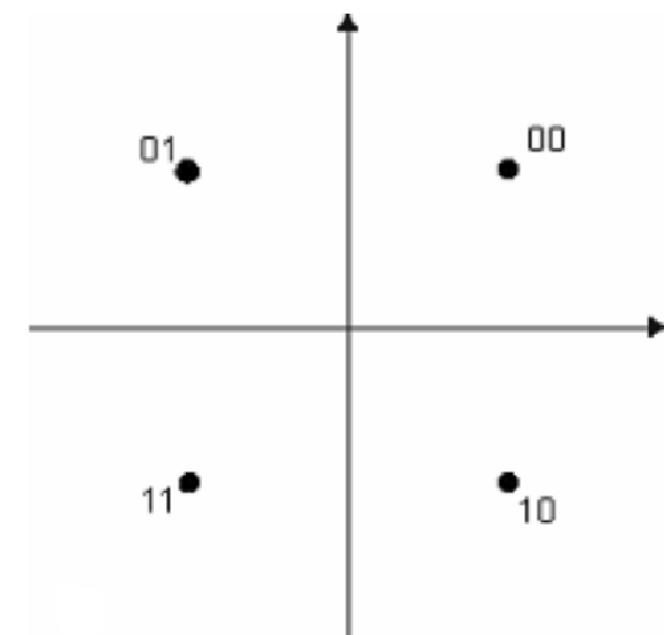
## □ Les combinaisons avec quadrature (QPSK)

- Pour gagner en vitesse de transmission, une technique consiste à utiliser plusieurs porteuses de même fréquence, mais déphasée de  $90^\circ$  (quadrature)
- Additionnées, elles donneront une unique porteuse à 4 états
- Cette méthode de modulation appelée **Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)**
- Peu sensible aux interférences et permet de reconstituer l'information, même si le bruit est important.

# Modulation: Les combinaisons de modulation

## □ Les combinaisons avec quadrature (QPSK)

Valeur binaire transmise	Phase de la 1 <sup>ère</sup> sous-porteuse	Phase de la 2 <sup>e</sup> sous-porteuse
00	0°	0°
01	180°	0°
10	0°	180°
11	180°	180°



□ Un graphique en 2 dimensions, dont chaque axe représente une sous-porteuse, permet de visualiser ces valeurs

Quadrature à 4 états

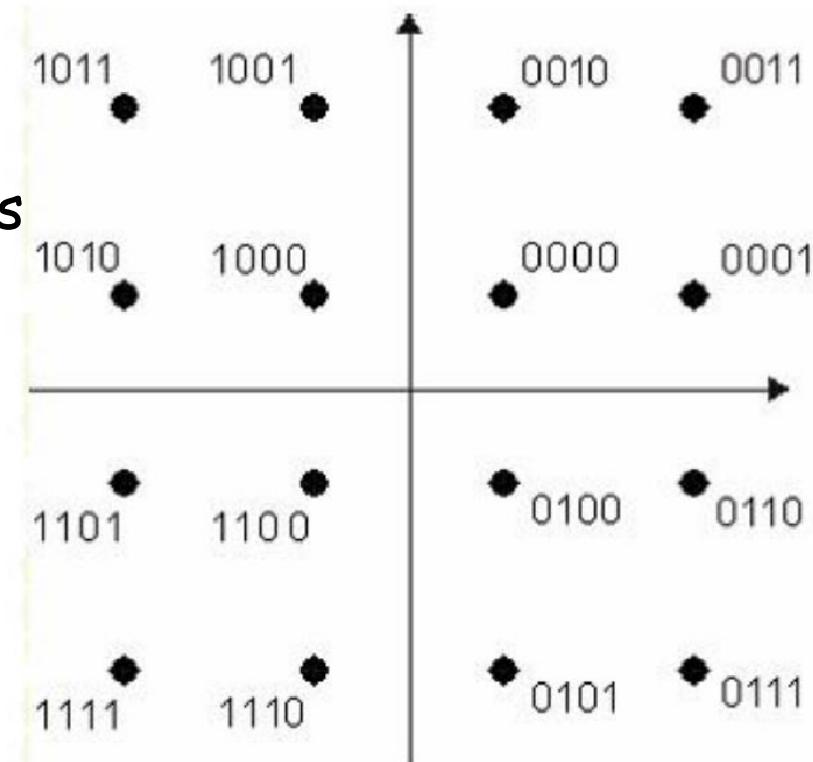
# Modulation: Les combinaisons de modulation

- Les combinaisons avec quadrature (QAM)
- Le nombre de bits codés par symbole peut être augmenté par combinaison de sous-porteuses et de modulation d'amplitude
- Cette technique est appelée **Quadrature Amplitude Modulation (QAM)**
- Par exemple, si chacune des 2 sous-porteuses est combinée à 2 modulations d'amplitude, le symbole comprend 4 bits, soit  $2^4 = 16$  états (QAM 16 ou 16 QAM)

# Modulation: Les combinaisons de modulation

## □ Les combinaisons avec quadrature (QAM)

- Cette technique de modulation combinée est utilisée par la technologie WiFi, dans les débits élevés
- des codages avec 5 bits par symbole (QAM 32 ou 32 QAM), 6 bits par symbole (QAM 64 ou 64 QAM), voire 7 bits par symbole (QAM 128 ou 128 QAM) sont possibles



Quadrature à 16 états

# Modulation 802.11

- La norme 802.11 repose sur trois types de modulation
  - FHSS (Frequency Hoping Spread Spectrum)
  - DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
  - OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

# Modulation 802.11 (FHSS)

- (FHSS) Frequency Hopping Spread Spectrum: Principe
- Etalement de spectre à saut de fréquence
- Elle fut utilisée pour le guidage des torpilles sans risque d'interférence.
- La communication utilise **successivement plusieurs fréquences de porteuse**, selon une séquence connue seulement de l'émetteur et du récepteur
- Ces changements synchronisés sont définis par une clé, qui précise les sauts (**Frequency Hopping**)
- Pour permettre ce fonctionnement, la bande utilisée doit auparavant être divisée en spectres étroits.

# Modulation 802.11 (FHSS)

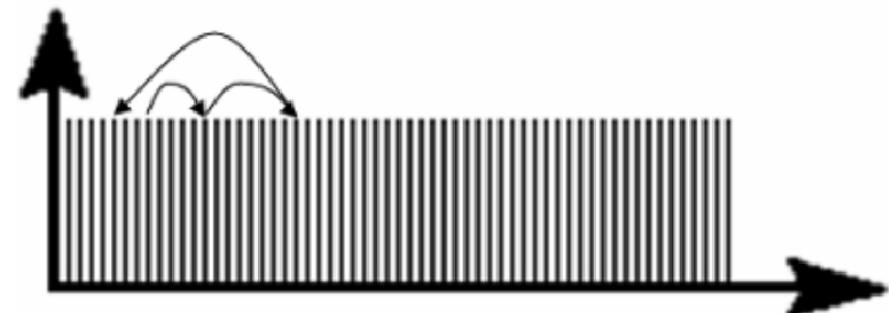
- (FHSS) Frequency Hopping Spread Spectrum: Principe**
- Technique traitée par le standard IEEE 802.11 et utilisée par les technologies **Bluetooth** et de téléphonie **DECT**
- Résistance aux interférences car si un signal est brouillé sur l'une des fréquences, il peut être renvoyé après le saut suivant
- Possibilité d'avoir **plusieurs communications simultanément** sensiblement au nombre de zones de fréquence définies
- Les spécifications 802.11 proposent la division de la bande 2.4 GHz, depuis **2.402 GHz** jusqu'à **2.482 GHz**, en un maximum de **79** zones de 1 MHz
- Chaque zone forme un canal numéroté. Le nombre exact de canaux dépend de la réglementation du pays d'utilisation



Téléphone DECT

# Modulation 802.11 (FHSS)

- (FHSS) Frequency Hopping Spread Spectrum: Débits
- Les débits du FHSS sont limités par la largeur de canal de 1 MHz
- En 802.11, le canal de 1 MHz permet un débit de **1 Mbps**.
- Par un doublement du nombre de bauds, la transmission peut augmenter jusqu'à **2 Mbps**
- Le débit est automatiquement adapté en fonction du rapport signal/bruit.



Étalement de fréquence par saut FHSS

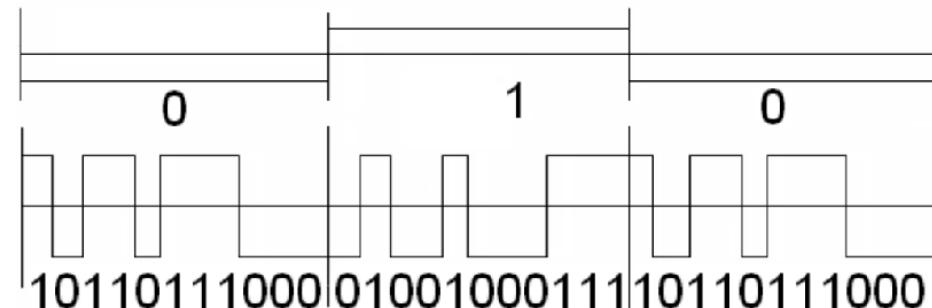
# Modulation 802.11 (DSSS)

- (DSSS) Direct Sequence Spread Spectrum: Principe
- Étalement de spectre à séquence directe
- DSSS exploite une fréquence continue et élargie. Autorisant de meilleurs débits
- DSSS Divise la bande **2,4 GHz** en **14 canaux de 22MHz**
- Exploitée dans les différentes spécifications du WiFi, sur les bandes **2.4 GHz et 5 GHz**
- Les données sont envoyées sur l'un des 14 canaux
- Une immunité importante au bruit est apportée
- Diminution des interférences grâce à la **technique de "chipping"**

# Modulation 802.11 (DSSS)

## (DSSS) Direct Sequence Spread Spectrum: Principe

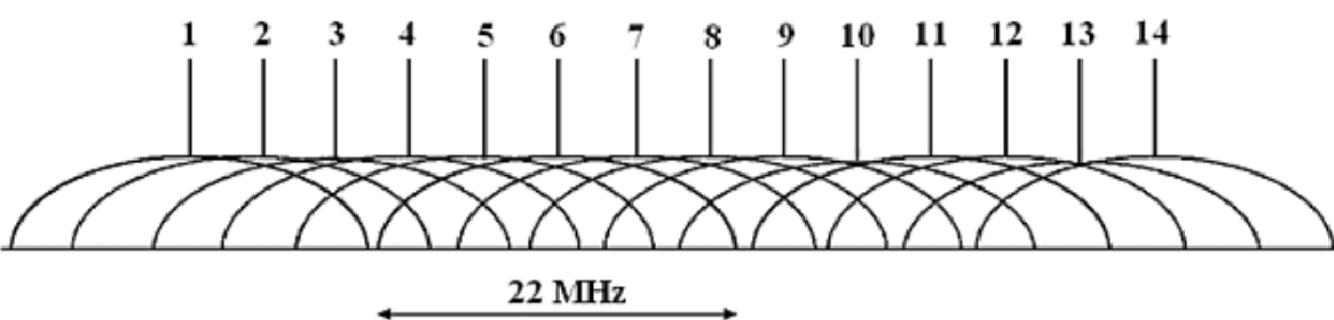
- Le Chipping consiste à envoyer une séquence complète de bits, pour un seul bit de données
- Le bit 1 sera remplacé par une succession de 11 bits 0 ou 1 (appelée code PN)
- Parallèlement le bit 0 sera remplacé par le **complémentaire** de la succession de bits utilisée pour le bit
- La largeur du canal de transmission est basée sur le **théorème de Shannon**, qui précise que la fréquence d'échantillonnage doit être au minimum égale au double du signal à numériser.  $F_{\text{échantillon}} \geq 2 \cdot F_{\text{max du signal}}$
- Ex:** Pour un débit de 11 Mbps, ce canal doit être large de 22 MHz.



# Modulation 802.11 (DSSS)

## □ (DSSS) Direct Sequence Spread Spectrum: Principe

Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fréquence (GHz)	2.412	2.417	2.422	2.427	2.432	2.437	2.442	2.447	2.452	2.457	2.462	2.467	2.472	2.484



Les 14 canaux de la bande 2.4 GHz en DSSS

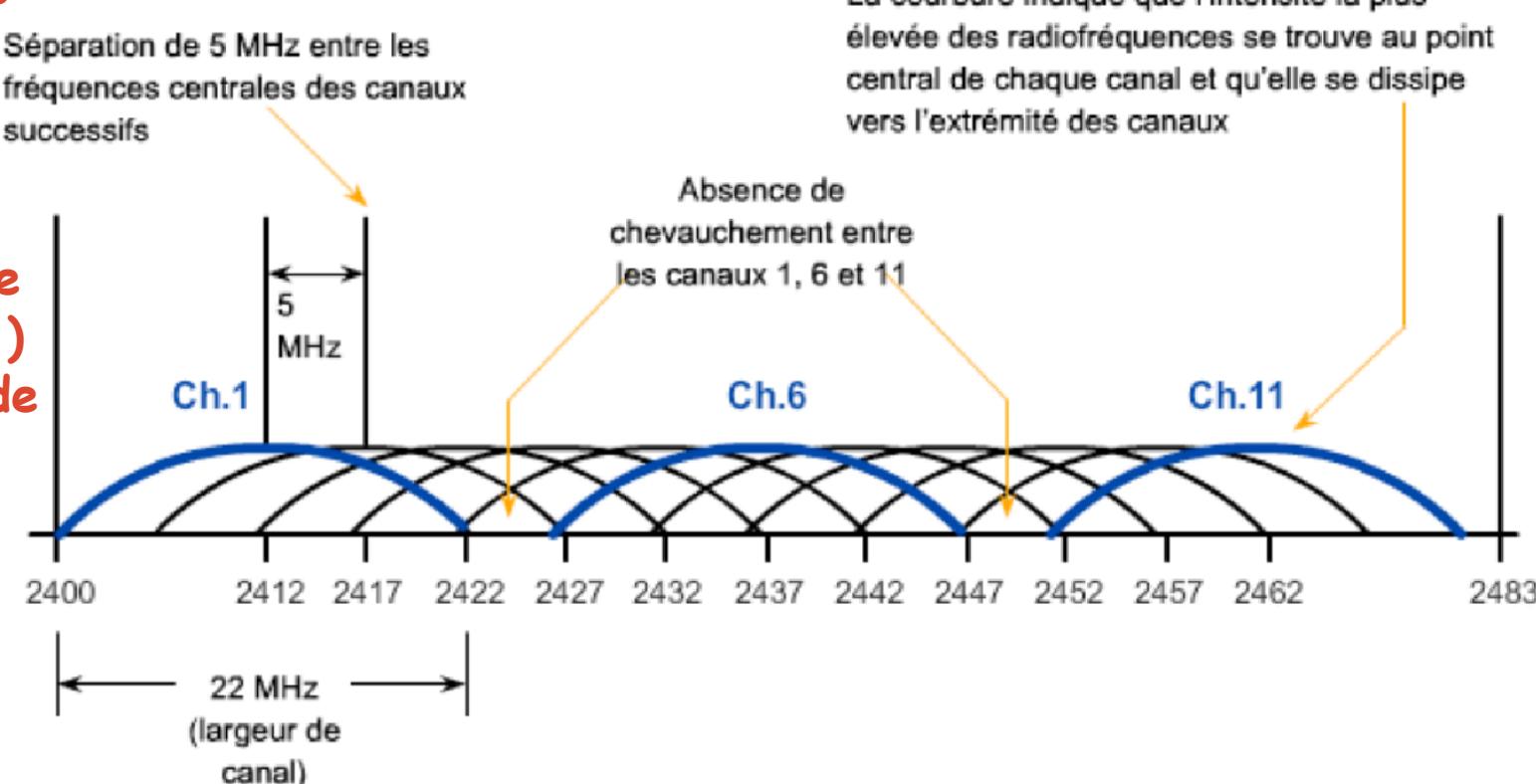
Canal	Fréquence basse (GHz)	Fréquence centrale (GHz)	Fréquence haute (GHz)
1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.446	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473
12	2.456	2.467	2.478
13	2.461	2.472	2.483
14	2.473	2.484	2.495

Les fréquences des 14 canaux 2.4 GHz

# Modulation 802.11 (DSSS)

□ Chevauchement entre les canaux

□ c'est la raison pour laquelle les canaux isolés (1, 6 et 11) distants les uns des autres de sont généralement utilisés.



# Modulation 802.11 (DSSS)

- La bande des 5 GHz est beaucoup plus large que celle des 2.4 GHz
- Le nombre de communications simultanées possibles sur cette bande de fréquences est donc beaucoup plus important qu'avec le 2.4 GHz
- Absence de chevauchement entre les bandes, donc pas de perturbations entre elles
- DSSS est la première technique d'étalement de spectre utilisée dans la pratique pour le WiFi. Elle autorise les débits de **1 Mbps** (Basic rate) et **2 Mbps** (Enhanced rate) comme FHSS
- Les spécifications 802.11b apportent une extension qualifiée de High rate, à des débits de **5.5 et 11 Mbps**

Canal	Fréquence basse (GHz)	Fréquence centrale (GHz)	Fréquence haute (GHz)
36	5.17	5.18	5.19
40	5.19	5.20	5.21
44	5.21	5.22	5.23
48	5.23	5.24	5.25
52	5.25	5.26	5.27
56	5.27	5.28	5.29
60	5.29	5.30	5.31
64	5.31	5.32	5.33
100	5.49	5.50	5.51
104	5.51	5.52	5.53
108	5.53	5.54	5.55
112	5.55	5.56	5.57
116	5.57	5.58	5.59
120	5.59	5.60	5.61
124	5.61	5.62	5.63
128	5.63	5.64	5.65
132	5.65	5.66	5.67
136	5.67	5.68	5.69
140	5.69	5.70	5.71

85

Les canaux 36 à 140 agréés pour une utilisation européenne

# Modulation 802.11 (OFDM)

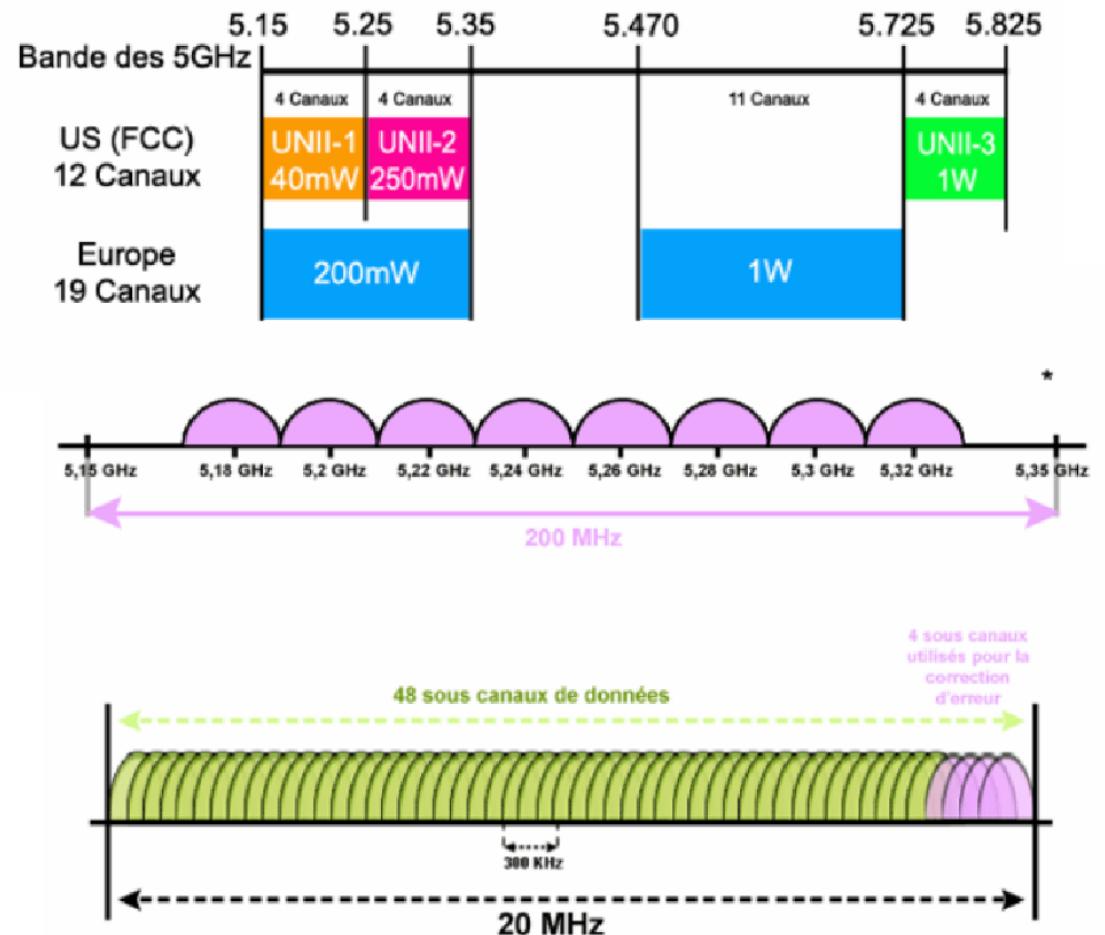
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) : Utilisée par
  - ✓ La norme 802.11a sur la bande de fréquence des 5 GHz.
  - ✓ La norme 802.11g, 802.11n, 802.11ac sur la bande de fréquence des 2,4 GHz.
- Repose sur la méthode de multiplexage fréquentiel
- OFDM Divise le canal en 52 sous-canaux
- Dans l'application des standards 802.11a et 802.11g, le canal est divisé en 52 sous-porteuses de 312.5 KHz chacune
- 48 utilisées pour la transmission de données. Les autres sous-canaux servent à la synchronisation et aux corrections associées.

# Modulation 802.11 (OFDM)

- OFDM dans la bande des 5GHz
- Sous-bandes (Low et Middle) de la bande U-NII sont divisées en 8 canaux de 20 MHz
- Chaque canal de 20 MHz est divisé en 52 sous-canaux de 300 KHz.
- Chaque sous-canal est modulé en utilisant

	Modulation	Débit (Mbit/s)
OFDM	BPSK	6
	QPSK	12
	16QAM	24
	64QAM	56

# Modulation 802.11 (OFDM)



□ OFDM dans la bande des 5 GHz

# Modulation 802.11 (OFDM)

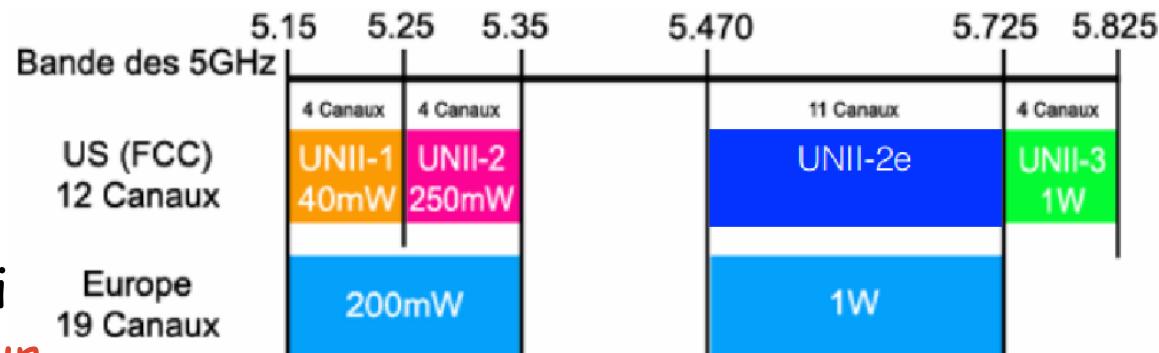
□ OFDM dans la bande des 5GHz

□ Les bandes UNII-1 et UNII-2 sont interdites pour les usages extérieurs

□ La bande UNII-2e est aussi bien utilisable en intérieur qu'en extérieur

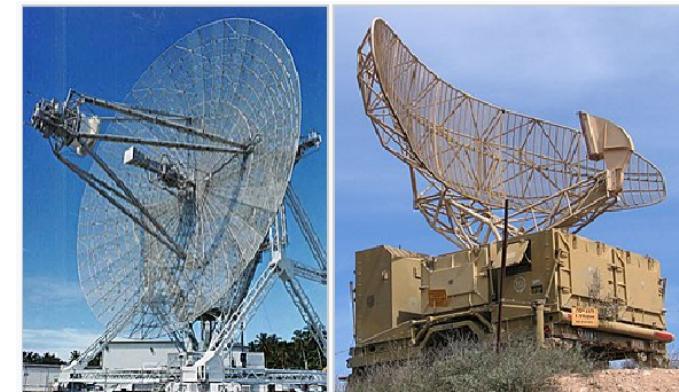
□ La bande UNII-3 est interdite, aussi bien pour un usage intérieur qu'extérieur

□ UNII-1 et UNII-2 sont limitées à 200mW (23dB). UNII-2e est limitée à 1W (30dB).



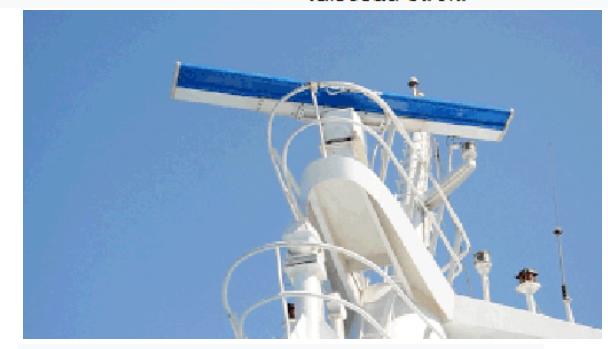
# Modulation 802.11 (OFDM)

- OFDM dans la bande des 5 GHz
- **Contrainte sur UNII-2 et UNII-2e:** D'autres technologies utilisent la **bande C (4 - 8 GHz)** comme les radars militaires, communications par satellite, les radars météorologiques
- **Solution:** Sélection Dynamique de Fréquence (DFS): conçu pour empêcher les interférences électromagnétiques
- Les points d'accès sélectionnent automatiquement les canaux de fréquence avec de faibles niveaux d'interférence
- En cas de détection radar, le point d'accès change de canal s'il est configuré pour sélectionner automatiquement le canal
- Si la sélection des canaux était effectuée manuellement, le DFS entraînerait la mise hors ligne du point d'accès.



Antenne radar longue portée , utilisée pour suivre des objets spatiaux et des missiles balistiques.

Radar du type utilisé pour la détection des aéronefs. Il tourne régulièrement, balayant l'espace aérien avec un faisceau étroit.



Antenne radar marine commerciale.

# Modulation 802.11 (MIMO)

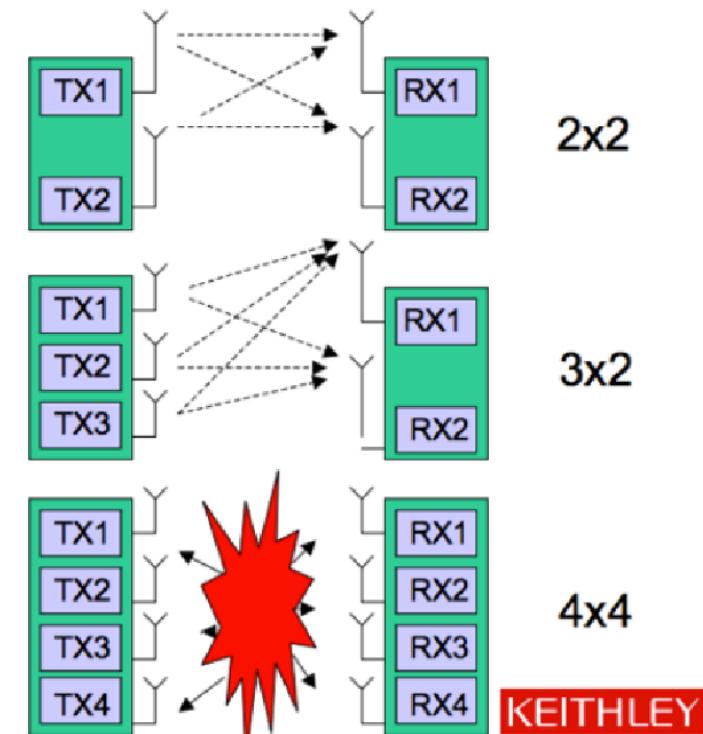
□ **MIMO (Multiple Input Multiple Output)** : Utiliser par **802.11n**

□ Cette technologie est le cœur du **802.11n**, elle propose d'utiliser jusqu'à quatre flux radio simultanés

□ Transmission ou réception **simultanée de plusieurs flux de données** (4 au max) sur un même canal en utilisant **plusieurs antennes**

□ MIMO Allie différentes techniques ce qui améliorent considérablement les capacités du signal:  
Débits théoriques jusqu'à 600 Mbit/s

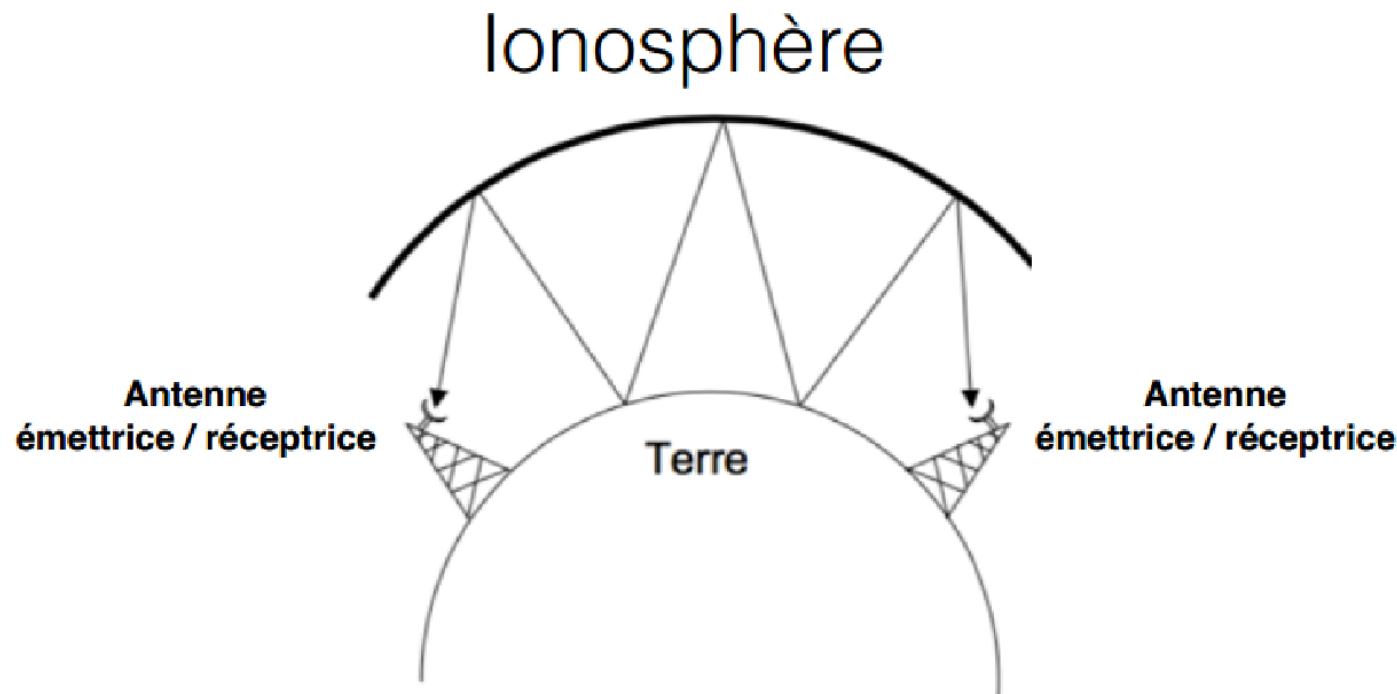
□ La multiplication des flux transmis augmente la consommation électrique, un mode d'économie d'énergie (**Power Save Mode**) a été défini. Il stipule que ces techniques ne seront utilisées que si cela est nécessaire.



# Propagation 802.11

## Type de propagation

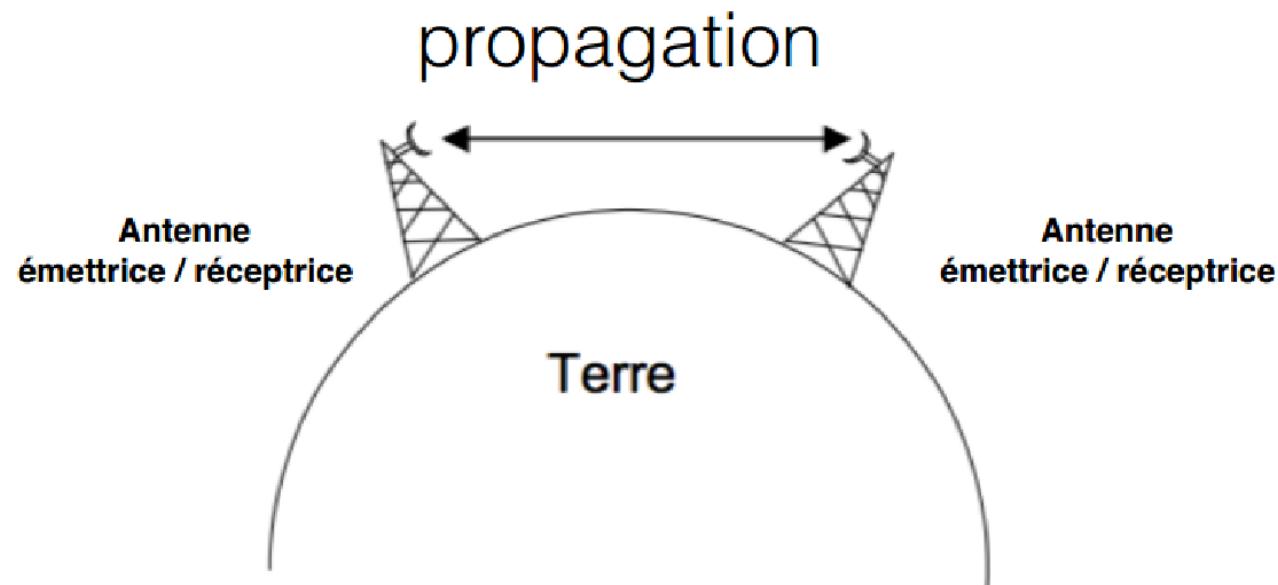
### Propagation ionosphérique



# Propagation 802.11

## Type de propagation

### Propagation ligne directe



# Propagation 802.11

## □ Terminologie

- **Puissance:** La puissance électrique,  $P$ , est mesurée en Watt (W). Elle résulte du produit de l'intensité du courant  $I$ , par sa tension  $U$  :  $P=UI$ .
- Une loi physique de la radio précise que plus la puissance d'émission de l'onde est élevée, plus sa portée est importante. Par contre, il est nécessaire d'augmenter l'intensité du courant, ce qui réduit la durée de vie de batterie d'un appareil mobile.
- Pour doubler la portée d'un signal, la puissance de l'émetteur doit être quadruplée
- En WiFi, les puissances émises seront mesurées en milliwatt (mW) :  $1000\text{mW}=1\text{W}$ .

# Propagation 802.11

## □ Terminologie

- **Gain:** Le gain mesure la capacité d'un équipement à concentrer les ondes
- Son unité est le **décibel (dB)** et il est noté **G**
- Le rapport entre le gain et la puissance est donnée par :  $G = 10 \log_{10} (P)$ :  
Avec  $P = P_{\text{sortie}}/P_{\text{entrée}}$
- Si la puissance est exprimée en **mW**, le gain est mesuré en **décibel par milliwatt (dBm)**. Un résultat positif du gain indique une amplification du signal
- Ex: Si  $P=1 \text{ mW}$ ,  $G=0 \text{ dBm}$
- Si  $P=10 \text{ mW}$ ,  $G=10 \text{ dBm}$
- Si  $P=100 \text{ mW}$ ,  $G=20 \text{ dBm}$ .

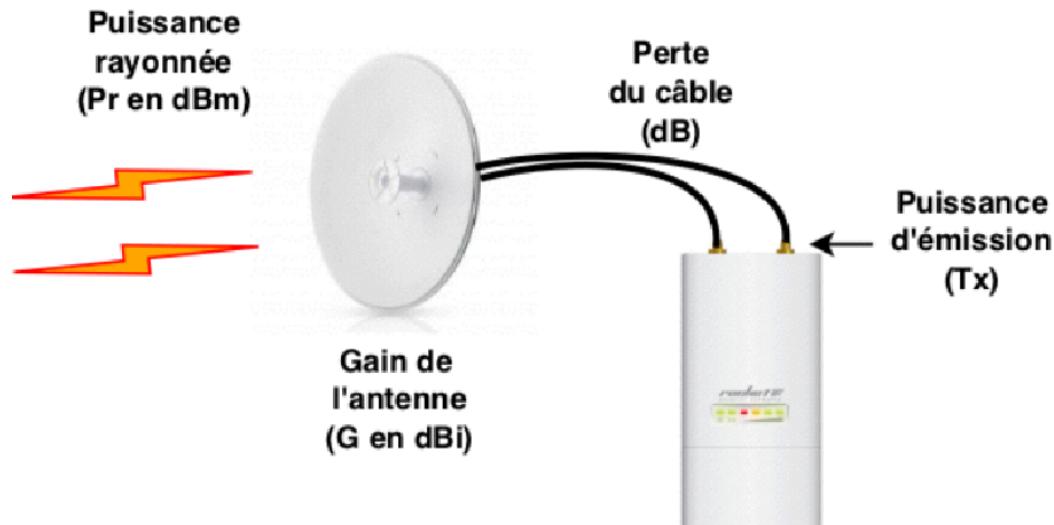
# Propagation 802.11

## Mesures

- **dBm: Décibel de milliWatts:** Mesure de la puissance d'un équipement radio (point d'accès sans fil)
- **mW: Milli-Watt:** Mesure de la puissance d'un équipement radio (point d'accès sans fil)
- **dBi: Décibel isotrope:** Mesure de la puissance (le Gain) d'une antenne
  - Le gain d'une antenne est exprimé dans un rapport **isotrope**. Une antenne isotrope, est représentée par un point, rayonnant de manière équivalente dans toutes les directions, comme une étoile. Son gain serait de **1**. Un tel composant n'existe pas dans la réalité.
  - La conversion entre dB et dBi s'effectue par un ajout de **2,14**:
  - **Exemple:** Si  $G=10$  dB, le gain isotrope  $G'$  est égal à  $12,14$  dBi

# Propagation 802.11

## ☐ Equipement Radio



Rappels sur le câblage :

Type de câble	Perte /m
RG174	- 2 dB
RG 58	- 1 dB
RG 213	- 0,6 dB
AIRCELL	- 0,38 dB
LMR-400	- 0,22 dB
AIRCOM	- 0,21 dB

### Point d'accès

$$\text{Puissance rayonnée [dBm]} = \text{puissance d'émetteur [dBm]} - \text{perte dans le câble [dB]} + \text{gain d'antenne [dBi]}$$

# Propagation 802.11

- **PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Équivalent)**
- Le gain d'une station d'émission radio est donc l'addition de la puissance de l'émetteur avec le gain de l'antenne.
- Si un câble relie l'un à l'autre, une perte est engendrée.
- Le résultat de cette formule donne la **Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE)**
- Exprimée normalement en **décibel/milliWatt (dBm)**, le plus souvent en décibel (**dB**).
- Utilisée dans le cadre de la réglementation

**Puissance rayonnée [dBm] = puissance d'émetteur [dBm] - perte dans le câble [dB]**  
**+ gain d'antenne [dBi]**

# Propagation 802.11

- PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Équivalent): Exemple!!!!
- Un émetteur de puissance 100 mW, soit 20 dBm, est relié directement à une antenne de gain 2,14 dBi, soit 0 dB: Déterminez le PIRE de la station en déduire la puissance totale de l'équipement
- Solution:  
PIRE = 20 dBm + 0 = 20dBm. (La puissance totale de l'équipement) = 100 mW
- Si l'on souhaite doubler la portée, en changeant l'antenne par une autre de gain 6 dBi, soit 3,86 dB. Déterminez le PIRE et la puissance de la station.
- Solution:

$$\text{PIRE} = 20 \text{ dBm} + 3,86 = 23,86 \text{ dBm}, \quad P_{\text{station}} = 10^{\frac{23,83}{10}} = 244 \text{ mW}$$

# Propagation 802.11

- PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Équivalent): Exemple!!!!
- Une antenne supposée ponctuelle d'une borne 802.11 émet avec une puissance de 100 mW (PIRE, Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente). L'énergie émise étant supposée se repartir sans perte uniformément à la surface d'une sphère dont le rayon correspond à la distance entre la source d'émission et l'antenne de réception

Calculer la densité de puissance à 10 m

- Solution:  
La puissance d'émission est « uniformément répartie » à la surface de la sphère

$$\text{Surface de la sphère } S = 4 \pi R^2 = 3,14159 * 4 * 10 * 10 = 12,566 \cdot 10^2 \text{ m}^2$$

$$\text{Densité de puissance } D = P / S = 100 \cdot 10^{-3} / 12,566 \cdot 10^2 = 7,9 \cdot 10^{-5}$$

# Propagation 802.11

## □ PIRE et Sensibilité

- le PIRE équivaut à la limite de puissance rayonnée autorisé en tenant en compte de son gain. Dépend du pays et de la fréquence utilisée.
- PIRE pour 2.4 GHz = +20 dBm soit 100 mW (Dans le cas général)
- PIRE pour 5 GHz = +23 dBm en intérieur et 30 dBm en extérieur (Dans le cas général)
- Le PIRE peut être réglé au niveau de l'émetteur comme du récepteur. Dans ce dernier cas, on parlera de sensibilité de l'appareil plutôt que de puissance.
- **Sensibilité de réception:** Détermine le seuil minimal de puissance devant être reçu pour que la carte radio du point d'accès puisse décoder le signal reçu
- La sensibilité se mesure en dBm, elle est toujours **négative**